

Periodical Part, Report, Published Version

Jensen, Jürgen; Mudersbach, Christoph; Dangendorf, Sönke
Untersuchungen zum Einfluss der Astronomie und des
lokalen Windes auf sich verändernde Extremwasserstände
in der Deutschen Bucht

KLIWAS Schriftenreihe

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105378>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Jensen, Jürgen; Mudersbach, Christoph; Dangendorf, Sönke (2013): Untersuchungen zum Einfluss der Astronomie und des lokalen Windes auf sich verändernde Extremwasserstände in der Deutschen Bucht. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde (KLIWAS Schriftenreihe, 25/2013). https://doi.org/10.5675/Kliwas_25.2013_Extremwasserstände.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

**KLIWAS Schriftenreihe
KLIWAS-25/2013**

**Untersuchungen zum Einfluss der Astronomie
und des lokalen Windes auf sich verändernde
Extremwasserstände in der Deutschen Bucht**

Koblenz, im Dezember 2013



KLIWAS Schriftenreihe KLIWAS-25/2013

**Untersuchungen zum Einfluss der Astronomie
und des lokalen Windes auf sich verändernde
Extremwasserstände in der Deutschen Bucht**

Autoren:

**Jürgen Jensen¹
Christoph Mudersbach¹
Sönke Dangendorf¹**

**¹ Forschungsinstitut Wasser
und Umwelt (fwu) an der
Universität Siegen**

Seite

Kapitel

Inhalt

03		INHALT
06	1	EINLEITUNG
08	2	DATEN UND MODELLE
08	2.1	WASSERSTÄNDE
11	2.2	METEOROLOGISCHE DATEN
16	3	ANALYSE DES WINDSTAUS
17	3.1	NICHTLINEARE INTERAKTION
18	3.2	STURMINDIZES
27	4	DAS WINDSTAUMODELL
27	4.1	ALLGEMEINES UND AUFBAU
30	4.2	SENSITIVITÄTSSTUDIEN ZUR INTERAKTION ZWISCHEN TIDE UND WINDSTAU
32	4.3	VERGLEICH MESSDATEN VERSUS REANALYSE
35	4.4	MODELLIERUNG UND VALIDIERUNG 1918-2008
43	4.5	ANWENDUNG DES MODELLES AUF ZWEI WEITERE PEGELSTANDORTE
50	5	DISKUSSION UND FAZIT
54	6	LITERATUR
58	7	ANHANG
58	7.1	PROJEKTABLAUFPLANUNG
58	7.1.1	PHASE 1: BERECHNUNG DER ZEITREIHEN DER ASTRONOMISCHEN TIDE UND DES WINDSTAUS FÜR VERSCHIEDENE PEGEL (FWU, BSH)
58	7.1.2	PHASE 2: BEZIEHUNG ZWISCHEN WASSERSTÄNDEN UND WIND AN EINZELNEN PEGELN (FWU, BSH UND DWD)

Abbildung 1:	a) Histogramme der stündlichen Astronomie berechnet mit dem Programm T-Tide (Pawlowicz et al. 2003, graue Balken) und der Astronomie des Vorhersagedienstes am BSH (Müller-Navarra, pers. Kommunikation, schwarze Balken). b) Zugehörige Differenzen in den relativen Häufigkeiten.	11
Abbildung 2:	Übersicht über Stationsdaten des Wind und Luftdrucks in der Deutschen Bucht.	12
Abbildung 3:	Übersicht über die verfügbaren Windmessungen (hier Geschwindigkeit, schwarz) von Feuerschiffdaten in der Deutschen Bucht 1929-2008. Die aus den Einzelmessungen zusammengesetzte Regionalzeitreihe ist in rot dargestellt.	14
Abbildung 4:	Häufigkeiten des Windstaumaximums in Relation zur Tidephase. Es wurden insgesamt 20160 Ereignisse (≥ 25 cm) analysiert.	18
Abbildung 5:	Wasserstand und Windstau am Pegel Cuxhaven im Januar 1990. Das Bild verdeutlicht die Unterschiede bei der Auswahl eines Kollektivs für Extremwertuntersuchungen.	19
Abbildung 6:	a) Windstauzeitreihe am Pegel Cuxhaven 1918-2008 mit Kennzeichnung der 100 größten Windstauereignisse über farbige Punkte. Die Farbskala definiert den Rang eines jeden Ereignisses. Zur Clusterung der Events wurde ein Grenzwert von 36 Stunden gewählt. Die Zeitreihe ist in fünf Bereiche von je 18,2 Jahren eingeteilt, für die jeweils die Anzahl beobachteter Top 100-Ereignisse ausgezählt wurde. Von links nach rechts traten jeweils 19, 14, 17, 25 und 25 Ereignisse in den jeweiligen Zeitfenstern auf. b) Häufigkeiten der Top 100 Ereignisse je Monat für den Zeitraum 1918-2008.	21
Abbildung 7:	a) Histogramm (graue Balken) des stündlichen Windstaus sowie die 95, 98, 99, 99.9 Perzentile (farbige Linien) am Pegel Cuxhaven 1918-2008. b) Zeitliche Entwicklung der 4 Perzentile als Jahreswerte (dünne Linie), sowie dem zugehörigen 10-jährigen gleitenden Mittel.	23
Abbildung 8:	Darstellung der drei unterschiedlichen „Storminess“-Indizes Grenzwertüberschreitung (Count, oben), Maximale jährliche Verweilzeit (Max. Duration, mitte), sowie der Intensität (Intensity, unten). Im rechten Teil der Grafik sind jeweils die Histogramme der Indizes für Grenzwerte größer den 95. bzw. 99. Perzentil dargestellt, während in der Mitte und rechts der zeitliche Verlauf der zugehörigen Indizes mitsamt eines 10-jährigen gleitenden Mittels aufgetragen ist.	25
Abbildung 9:	Darstellung der astronomischen Tide über das Jahr 2008 am Pegel Cuxhaven. Die Farbskalierung gibt unterschiedliche Überschreitungsklassen an, welche zur Berücksichtigung der Interaktion zwischen Tide und Windstau verwendet werden.	29
Abbildung 10:	Ergebnis der Sensitivitätsstudien mit Hilfe der 20CR und dem Windstau am Pegel Cuxhaven über die Periode 1950-2008. a) RMSE (rot) und Bestimmtheitsmaß (blau) in Abhängigkeit der gewählten Höhenklassen zur Berücksichtigung der Interaktion zwischen Tide und Windstau. b) Differenzen zwischen gemessenen und modellierten Perzentilen des Windstaus (blau 1. Perzentil, rot 99. Perzentil).....	32
Abbildung 11:	Korrelationsplots zwischen modelliertem (y-Achse) und gemessenem Windstau (x-Achse) am Pegel Cuxhaven unter Verwendung von Mess- (links) und Reanalysedaten für die Periode 1976-1999 (oben). Aus grafischen Gründen ist hier nur jeder zehnte Wert dargestellt. Im unteren Teil der Grafik sind die zugehörigen Verteilungsfunktionen des Windstaus zu sehen (schwarz – gemessen; grau – modelliert).	34
Abbildung 12:	Modellierung der 10 größten Windstauereignisse in der Periode 1976-1999 am Pegel Cuxhaven für ein Windstaumodell, welches bei als lokalen Wind Messdaten der Station Scharhörn berücksichtigt (rot) und ein Windstaumodell, das bei allen Komponenten Reanalysedaten als Input nutzt.	35

Abbildung 13:	Vergleich des stündlich gemessenen (schwarz) und über 20CR rekonstruierten Windstaus für die Jahre 1990 bis 1994 am Pegel Cuxhaven. Die Sturmflutsaisons von Oktober bis März sind durch die blaue Schattierung hervorgehoben.....	37	KLIWAS-25/2013
Abbildung 14:	a) Perzentile des gemessenen (schwarz) und rekonstruierten (rot) Wasserstandes. b) Korrelation zwischen gemessenen und rekonstruierten jährlichen Perzentilen am Pegel Cuxhaven 1918-2008.	38	Untersuchungen zum Einfluss der Astronomie und des lokalen Windes auf sich verändernde Extremwasserstände in der Deutschen Bucht
Abbildung 15:	Vergleich der 10 größten Windstauereignisse über den gesamten Aufzeichnungszeitraum am Pegel Cuxhaven.	39	
Abbildung 16:	Vergleich Messung versus Rekonstruktion für vier Sturmflutereignisse. Aufgetragen sind der gemessene Gesamtwasserstand (blaue Linie mit Kreuzen), der rekonstruierte Gesamtwasserstand (blaue Linie mit Kreisen), der gemessene Windstau (schwarze Linie mit Kreuzen), der rekonstruierte Windstau (rote Linie mit Kreisen), sowie die Differenzen zwischen Messung und Rekonstruktion (lila Balken).	40	
Abbildung 17:	Zeitliche Entwicklung der Gütekriterien zwischen modelliertem und rekonstruiertem Windstau auf Basis der 20CR Inputdaten für Cuxhaven 1918-2008. a) Bestimmtheitsmaß, b) Index of Agreement und c) RMSE.	41	
Abbildung 18:	10 jähriges gleitendes Mittel ausgewählter Perzentile aus gemessenen und aus 20CR rekonstruierten Gesamtwasserständen (astronomische Tide plus rekonstruierter Windstau). Der schattierte Bereich um die Messwerte gibt die Standardabweichung der gleitenden Mittel wieder. Für den verfügbaren Zeitraum sind außerdem die rekonstruierten Wasserstände aus Feuerschiffmessungen integriert (grün).	42	
Abbildung 19:	Lineartrends der Perzentile des Gesamtwasserstands für Mess- und Modellwerte am Pegel Cuxhaven für den Zeitraum 1918-2008. Die Unsicherheitsbänder kennzeichnen den 1 σ -Standardfehler.	43	
Abbildung 20:	Vergleich des stündlich gemessenen (schwarz) und über 20CR rekonstruierten Windstaus für die Jahre 2000 bis 2004 am Pegel Norderney. Die Sturmflutsaisons von Oktober bis März sind durch die blaue Schattierung hervorgehoben.....	46	
Abbildung 21:	Vergleich der 10 größten Windstauereignisse über den Aufzeichnungszeitraum 2000-2008 am Pegel Norderney.	47	
Abbildung 22:	Vergleich des stündlich gemessenen (schwarz) und über 20CR rekonstruierten Windstaus für die Jahre 2000 bis 2004 am Pegel Hallig Hooge. Die Sturmflutsaisons von Oktober bis März sind durch die blaue Schattierung hervorgehoben.....	48	
Abbildung 23:	Vergleich der 10 größten Windstauereignisse über den Aufzeichnungszeitraum 2000-2008 am Pegel Hallig Hooge.	49	

1 Einleitung

Wasserstände an Küsten unterliegen stetigen Veränderungen unterschiedlicher temporärer wie räumlicher Ausprägung. Dabei werden die beobachteten Veränderungen durch unterschiedlicher Antriebsfaktoren verursacht. Approximativ lassen sich die gemessenen Wasserstände in die Komponenten Tide, mittlerer Meeresspiegel (MSL) und meteorologische Anteile (Windstau) aufspalten (Pugh 2004). In der Nordsee sind es die Gezeiten mit einem mittleren Hub von 2-4 m, welche den größten Anteil an Wasserstandsschwankungen ausmachen. Hinzu kommen durch die Interaktion zwischen Atmosphäre und Ozean Wettereinflüsse infolge des Energieeintrags durch Wind und Luftdruckschwankungen, welche häufig wegen der chaotischen Natur der Atmosphäre approximativ als stochastisch angenommen werden. Der Hauptanteil dieser Einflüsse auf den Wasserstand agiert auf Zeitskalen kürzer als ein Monat. Neben diesen kurzperiodischen Anteilen werden die Wasserstände auf langen Zeitskalen von mehreren Dekaden oder Jahrhunderten durch den globalen Meeresspiegelanstieg infolge der globalen Erwärmung und daran gekoppelte Prozesse, sowie lokale Landhebungs-/Landsenkungsprozesse angetrieben. Die Kenntnis über die Ausprägung einzelner Einflussparameter auf die Wasserstände und ihrer Wirkungsketten stellt die Basis zur Abschätzung zukünftiger Zustände dar.

Die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Wasserstände der Nordsee ist für Bemessungsaufgaben im Bereich des Küsteningenieurwesens eine wichtige Einflussgröße. Dabei wird häufig approximativ angenommen, dass die Entwicklung extremer Wasserstände, welche wiederum maßgebend für die Bemessung von Küstenschutzbauwerken sind, direkt und maßgeblich an die Entwicklung des mittleren Meeresspiegel gekoppelt ist (Hunter 2010, Haigh et al. 2011). Mit Hilfe von Tidepegelaufzeichnungen konnte diese Annahme auf quasi-globaler (Menendez und Woodworth 2010, Woodworth et al. 2011, Vilibic et al. 2013) sowie regionaler Skala (Marcos et al. 2009, etc.) bestätigt werden. Jedoch zeigen auch einige wenige regionale/lokale Analysen (Bromirski et al. 2003, Cayan et al. 2008, Abeyiriguanawardena und Walker 2008), dass neben dem MSL durchaus auch lokale oder regionale Veränderungen im Sturmklima einen signifikanten zusätzlichen Einfluss auf die regionalen Wasserstände haben können.

In der Deutschen Bucht ging man bisher ebenfalls davon aus, dass Veränderungen extremer Wasserstände in erster Linie durch die mittleren angetrieben werden (Weisse et al. 2011 und Referenzen darin). Diese Erkenntnis basierte auf Analysen der Extremwasserstände in Relation zu den mittleren Tidehochwassern (MThw, WASA group 1998). Die MThw unterscheiden sich jedoch signifikant vom MSL, sowohl in ihrer Langzeitentwicklung als auch in ihrer Variabilität (Wahl et al. 2010). In einem Vorgängerprojekt (Jensen et al. 2012) konnte gezeigt werden, dass die Trends in den

extremen Wasserständen den MSL in den vergangenen 50 Jahren deutlich überstiegen haben (Dangendorf et al. 2013, Mudersbach et al. im Review). Als Gründe für diese divergente Entwicklung werden sowohl Veränderungen in den lokalen Extremwinden (Dangendorf et al. 2013) als auch Modifikationen des lokalen Tideregimes (Mudersbach et al. im Review) in Betracht gezogen. Eine genaue Quantifizierung dieser Einflüsse konnte bisher jedoch nicht abschließend erfolgen und ist wohl nur mit Hilfe hydrodynamisch-numerischer Modellierung möglich (vor allem die der Partialtiden). Veränderungen im meteorologischen Anteil des Wasserstandes (Windstau) jedoch können über die Filterung der Partialtiden aus den Wasserständen mit hinreichender Genauigkeit quantifiziert werden (Pugh 2004). Hierin besteht auch das Ziel der aktuellen Studie. In einer Kooperation des Forschungsinstituts für Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen, dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Hamburg, sowie dem Deutschen Wetterdienst (DWD) wurden im Rahmen des Ressortforschungsvorhabens KLIWAS, gefördert durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), umfangreiche Analysen des Windstaus in der Deutschen Bucht über das vergangene Jahrhundert durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analysen werden in dem vorliegenden Bericht detailliert beschrieben und diskutiert. Dabei konzentrieren sich die Analysen auf drei wesentlichen Aufgabestellungen:

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

1. Trennung des astronomischen Gezeitenanteils vom quasi-stochastischen Windstau.
2. Analyse des Windstaus in der Deutschen Bucht über die vergangenen 90 Jahre.
3. Prüfung eines empirisch-statistischen Zusammenhanges zwischen den meteorologischen Einflussfaktoren Wind und Luftdruck und dem Windstau.

Die Struktur des Beitrages ist dabei wie folgt: In Kapitel 2 werden die verwendeten Daten mitsamt ihrer Herkunft und Auflösung, sowie die verwendeten Methoden beschrieben. In Kapitel 3 wird der Windstau analysiert, während in Kapitel 4 der Aufbau eines statistisch-empirischen Windstaumodelles beschrieben wird. Der Beitrag endet mit einer Diskussion der Ergebnisse.

2 Daten und Modelle

2.1 Wasserstände

Die Grundlage der Analysen bilden hochauflösende Wasserstandsaufzeichnungen in Form von stündlichen Messwerten am Pegel Cuxhaven. Die Daten stammen aus dem Archiv des BSH und wurden seinerzeit in umfangreichen Digitalisierungskampagnen unter Leitung von Herrn Dipl.-Ing. Annutsch rekonstruiert. Der Datensatz ist vom Jahr 1918 bis 2008 verfügbar und stellt somit die längste hochauflösende Wasserstandszeitreihe in der Deutschen Bucht dar. Für Vergleichszwecke werden für das Windstaumodell weitere Messdaten der Pegel Husum und Norderney herangezogen. Diese liegen jeweils ebenfalls in Form von Stundenwerten für einen gemeinsamen Zeitraum von 2000-2008 vor.

Gemessene Wasserstände an Küstenpegeln stellen das Resultat der Kombination unterschiedlicher Wirkungsprozesse dar. Den größten Einfluss auf die Veränderung des Wasserstandes haben die Gezeiten, die durch die Massenanziehung zwischen Sonne, Mond und Erde verursacht werden. Die Gezeiten resultieren aus der Überlagerung einer Vielzahl unterschiedlicher Partialtiden, welche alle eine unterschiedliche Amplitude, Frequenz und Phase besitzen (Godin 1976). Das gemessene Tidesignal ist die Summe aller Partialtiden. Hierbei sind die Frequenzen astronomisch vordefiniert, wobei die Amplituden und Phasen lokal spezifisch abgeleitet werden müssen. Neben den Gezeiten werden die Wasserstände vor allem durch atmosphärische Einflüsse wie Wind und Luftdruck, sowie Massenänderungen und -verlagerungen beeinflusst. Die Herausforderung besteht in der Trennung der einzelnen Einflüsse voneinander. Eine Methode zur Trennung besteht in der Berechnung des astronomischen Anteils. Da der astronomische Anteil durch feste Frequenzen einzelner Partialtiden vorgegeben ist, lässt sich dieser approximativ ermitteln.

Ein anerkanntes Verfahren zur Ermittlung der Astronomie besteht in der harmonischen Analyse (Godin 1972). Die harmonische Analyse basiert auf der Annahme, dass der gemessene Wasserstand an einem Pegel über

$$y_i = A_0 + \sum_{j=1}^M A_j \cos(\sigma_j t_i - \Phi_j) , \quad (1)$$

angenähert werden kann. Hierbei stehen die Kürzel A_j , σ_j und Φ_j für die Amplitude, Frequenz und Phase einer Partialtide. Für jede Partialtide kann die Gleichung aufgelöst werden durch:

$$A_j \cos(\sigma_j t_i - \Phi_j) = C_j \cos(\sigma_j t_i) + S_j \sin(\sigma_j t_i) , \quad (2)$$

wobei A_j , und Φ_j nach

$$A_j = (C_j^2 + S_j^2)^{1/2} \quad \text{und} \quad \Phi_j = \arctan \left(S_j / C_j \right) \quad (3)$$

aufgelöst werden können. Die große Anzahl aufzulösender Partialtiden erfordert umfangreiche Annahmen und recht großen Rechenaufwand. Hierfür stehen unterschiedliche frei zugängliche Softwarepakete zur Verfügung:

TASK 2000: Bell et al. (1996) entwickelten am National Oceanography Centre in Liverpool, UK das Programm TASK 2000 (Tidal Analysis Software Kit). Dieses ist auf Nachfrage verfügbar, wurde in den vorliegenden Untersuchungen jedoch nicht verwendet.

T-Tide: Pawlowicz et al. (2002) entwickelten an der University of British Columbia ein Matlab basiertes Softwarepaket zur Partialtidenanalyse auf der Basis früherer Fortran Codes von Foreman (1977, 1978). Dieses Tool ermöglicht die Partialtideanalyse für Zeitreihenlängen bis ein Jahr, unter der Anbringung approximativer Nodal-/Satellitenkorrekturen. Aufgrund dieser Korrekturen sind längere Zeitreihen nicht analysierbar.

U-Tide: U-Tide basiert auf T-Tide und wurde von Codiga et al. (2011) entwickelt, um die Auswertung langjähriger hochauflösender Zeitreihen zu ermöglichen. Das Programm enthält verfahrenstechnische Erweiterungen, die dem Stand der Wissenschaft entsprechen (Leffler und Jay 2009, Foreman et al. 2009).

Für die vorliegenden Untersuchungen wurden zunächst umfangreiche Analysen zur Verwendbarkeit der beiden oben genannten Produkte T-Tide und U-Tide auf die Pegelwasserstände entlang der Deutschen Bucht durchgeführt (TASK 2000 war leider nicht verfügbar, basiert aber grundsätzlich auf den gleichen Annahmen wie T-Tide). Hierzu wurden die errechneten Astronomien mit denen des BSH verglichen, wobei umfangreiche Erläuterungen im Zwischenbericht (Jensen et al. 2013) diskutiert sind und hier nur noch angerissen werden. Der maßgebliche Unterschied zwischen U-/T-Tide und dem BSH-Verfahren besteht zum Einen darin, dass U- und T-Tide auf der einfachen harmonischen Analyse (s.o.) der gesamten aufgezeichneten Tidekurve basieren, während das BSH Verfahren Koeffizientensätze für unterschiedliche Tidephasen berechnet, um nichtlineare Effekte besser zu berücksichtigen. Zum Anderen bestehen Unterschiede in der Berücksichtigung diverser Flachwassertiden, die für eine akkurate Bestimmung des astronomischen Anteils in der Deutschen Bucht eine gewichtige Rolle spielen. Des Weiteren erfolgt beim BSH die Bestimmung der Amplituden der einzelnen Partialtiden auf Grundlage eines Kollektivs der Länge von 19 Jahren um Modulationen langperiodischer Zyklen auf kurzperiodische Schwingungen zu berücksichtigen, während in T-Tide approximativ auch Analysen über ein einzelnes Jahr möglich sind (hier werden zur Berücksichtigung Modulation sogenannte Satellitenkorrekturen vorgenommen, siehe auch Pawlowicz et al. 2003).

Abbildung 1 zeigt die Histogramme der stündlichen astronomischen Vorausberechnung für den Pegel Cuxhaven über die Periode 1918-2008. Die Abbildung zeigt eine typische Wasserstandsverteilung mit zwei Höckern um die Tidehoch- bzw. Tideniedrigwasser. Die Astronomie des BSH zeigt verhältnismäßig etwas weniger extreme Werte als die T-Tide Astronomie. Dies führt vor allem im Bereich der mittleren Tideniedrigwasser zu vergleichsweise größeren Differenzen zwischen beiden Astronomien (Abbildung 1b). Die Differenzen zwischen den Astronomien liegen jedoch insgesamt in einem sehr moderaten Bereich von ungefähr -0,7 % und +0,4 %. Eine mögliche Begründung für die etwas höheren Differenzen im Tideniedrigwasserbereich können in T-Tide nichtberücksichtigte Flachwassertiden sein. Auf Langzeituntersuchungen, wie in Mudersbach et al. (under review) geschehen, sollten die ermittelten Differenzen jedoch keine signifikanten Auswirkungen haben. Auf Grundlage der getätigten Analysen, sowie den verfügbaren Datenbeständen wurde daher wie folgt vorgegangen:

Für die Betrachtung der Langzeitstudien am Pegel Cuxhaven wird auf die Astronomie des BSH zurückgegriffen.

Für die Beiden Pegel Husum und Norderney hingegen werden aufgrund der begrenzten Zeitreihenlängen (< 19 Jahre) Astronomien mit Hilfe der Software T-Tide ermittelt.

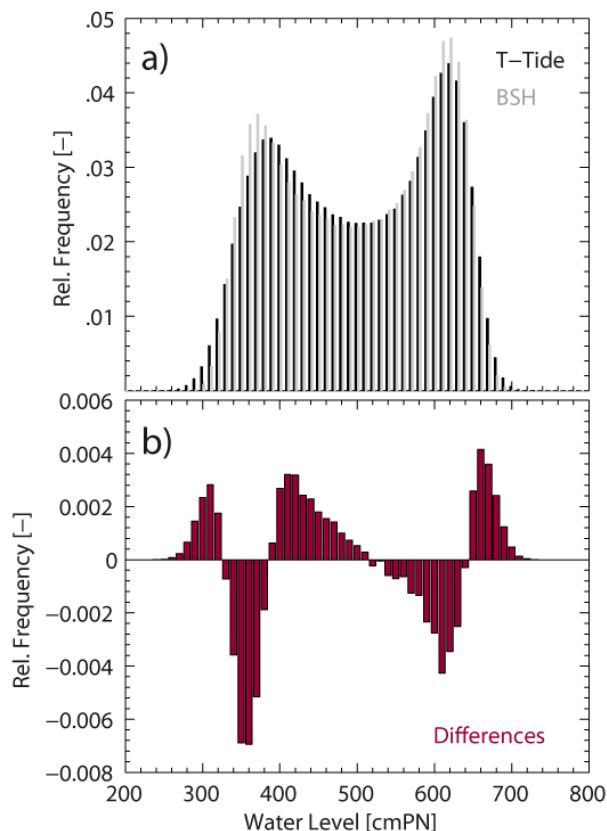


Abbildung 1: a) Histogramme der stündlichen Astronomie berechnet mit dem Programm T-Tide (Pawlowicz et al. 2003, graue Balken) und der Astronomie des Vorhersagedienstes am BSH (Müller-Navarra, pers. Kommunikation, schwarze Balken). b) Zugehörige Differenzen in den relativen Häufigkeiten.

2.2 Meteorologische Daten

Für die Analysen des Windes standen synoptische Winddaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) entlang der Deutschen Bucht zur Verfügung. Einen Überblick über die verfügbaren Stationen ist in Abbildung 2 gegeben. Die Stationen liefern Windmessungen unterschiedlicher Zeitreihenlänge, Auflösung und Qualität. Die ersten synoptischen Windmessungen fangen in den 1950er Jahren an, wobei die Qualität der Windmessungen stark durch anthropogene Eingriffe überprägt ist (Lindenberg et al. 2012). Für die vorliegenden Untersuchungen wurden zur Integration der Stationsdaten daher auf Datensätze mit nachweislich guter Qualität zurückgegriffen. So wurden die Daten der Station Scharhörn für die Periode 1976-1999 für den Vergleich mit dem Windstau am Pegel Cuxhaven verwendet, da diese zum einen eine räumliche Nähe zum Pegel Cuxhaven und zum anderen qualitativ hochwertige stündliche Messwerte liefert. Für den Pegel Husum wurden auf dieser Basis die Stationdaten Hallig Hooge genutzt, während am Pegel Norderney die Daten der Norderneyer Station verwendet wurde.

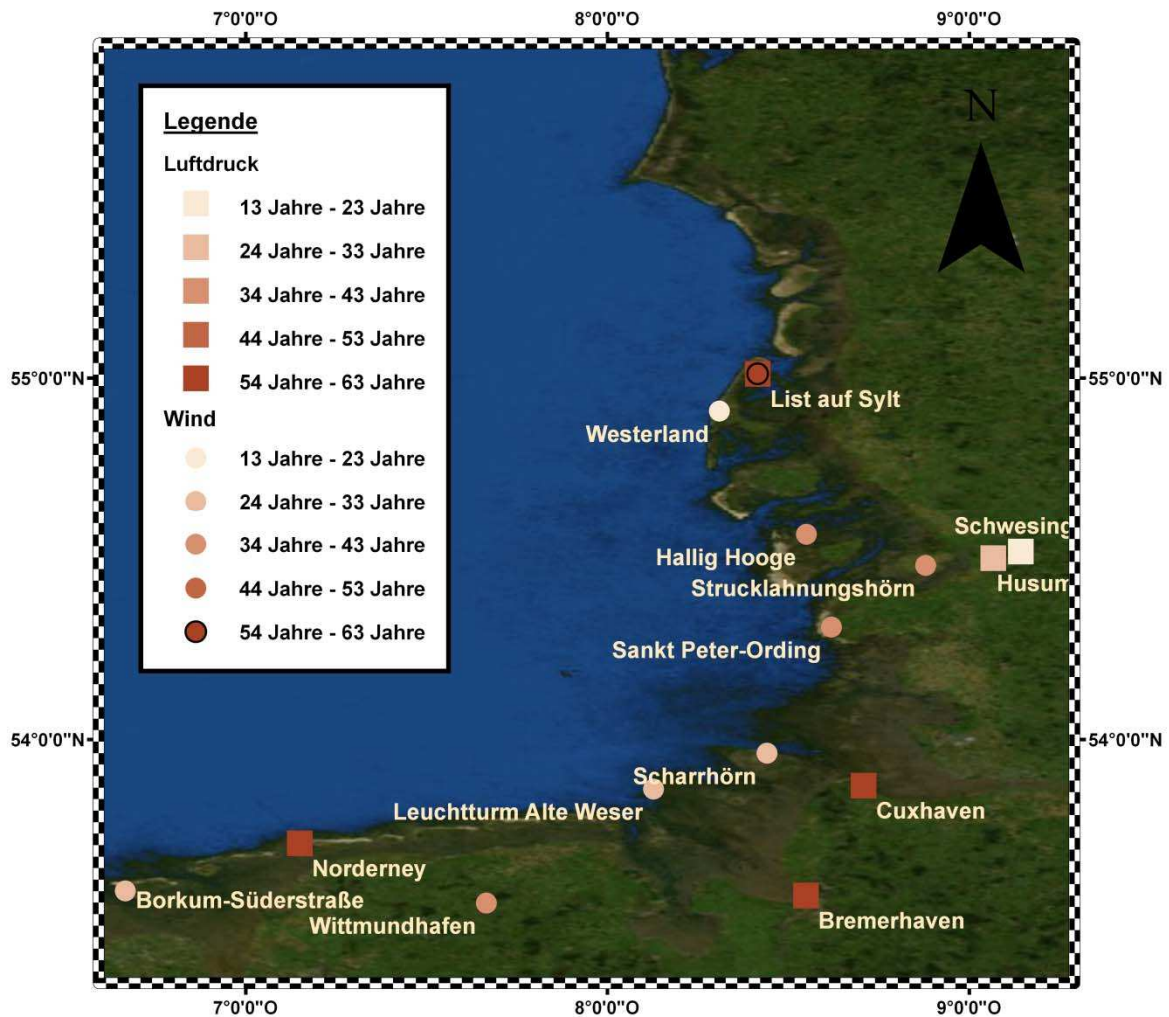


Abbildung 2: Übersicht über Stationsdaten des Wind und Luftdrucks in der Deutschen Bucht.

Als Ergänzung zu den synoptischen Daten wurden des Weiteren Windmessungen von Feuerschiffen des BSH/DWD integriert. Feuerschiffe sind zur Sicherung der Seeschifffahrt seit ca. 1920 im Einsatz. Erste meteorologische Messungen der Schiffe liegen seit ca. 1929 durch das Feuerschiff Elbe 1 vor. In den ersten Jahrzehnten wurden die meteorologischen Messungen durch Seeleute durchgeführt. Ab ca. 1949 wurden die Feuerschiffe dann nach und nach mit Windmessern ausgerüstet. Diese Windmesser befinden sich je nach Schiff in einer Höhe von ca. 14-22,5 m. Die Daten der Feuerschiffe werden in der vorliegenden Untersuchung integriert um Aussagen über frühere Perioden, für die keine Daten an der Station Scharhörn vorliegen, tätigen zu können. In der Summe standen Daten von 9 Feuerschiffen zur Verfügung (FS Deutsche Bucht, FS Ems, FS Weser, FS P8, Elbe 1-3, FS Bremen, FS Borkumriff. Auch hier liegen die Daten in unterschiedlicher Zeitperioden, Auflösung und Qualität vor. Hinzu kommt, dass die Feuerschiffe an wechselnden Positionen gemessen haben, sowie unterschiedliche Messhöhen aufweisen. Die Herausforderung liegt demnach in der Filterung einer regional gültigen homogenen Messreihe des 10m Windes. Die

Problematik bei den Winddaten besteht vor allem darin, dass die einzelnen Zeitreihen zumeist kein homogenes Bild liefern und die einzelnen Feuerschiffe untereinander zum Teil erhebliche Unterschiede in den Messungen aufweisen. Daher besteht das grundsätzliche Problem bei Winddaten in der Findung einer Referenzzeitreihe, welche für die Homogenisierung der einzelnen Feuerschiffdaten (Stationsdaten) herangezogen werden kann. Wasserstände hingegen liefern vergleichsweise sehr homogene Messungen mit großer Genauigkeit. Nach Trennung des astronomischen Anteils aus den Pegelmessungen bleibt also ein grundsätzlich homogenes Signal, welches Informationen über die Intensität/Richtung des Windes enthält. Daher liegt es nahe, diese Informationen auch für die Homogenisierung der Windmessungen zu verwenden. In diesem Projekt wurde daher zum ersten Mal ein pragmatischer Ansatz zur Filterung einer regional gültigen homogenen Windmessreihe getestet. Dieser basiert auf den täglichen Korrelationen zwischen den stündlichen Werten des Windstaus am Pegel Cuxhaven und den auf Stundenwerte interpolierten Windmessungen (Auflösung der Daten steigt im Laufe der Zeit, nach Einrichtung automatischer Messgeräte 1949 liegen die Messreihen in Dreistundenintervallen vor, ab 1990 auch stündlich). Hierzu wird ein Zeitfenster von 24 Stunden mit einer Schrittweite von ebenfalls 24 Stunden über die Zeitreihen geschoben. Für jeden Tag werden die Korrelationen zwischen allen verfügbaren Windmessungen (umgerechnet auf den Windstauparameter g_4 aus Gleichung 8, siehe Kapitel 4.1) und dem „gemessenen“ Windstau am Pegel Cuxhaven berechnet. Die Feuerschiffmessung, die die größte Übereinstimmung mit dem Windstau am Pegel Cuxhaven aufweist (maximale Korrelation), wird als repräsentativ für das regionale Windfeld angenommen. Somit erhält man also eine Zeitreihe, die sich aus unterschiedlichen Windmessungen zusammensetzt und die größte Übereinstimmung mit dem als homogen angesetzten Windstau in Cuxhaven aufweist. Dies hat zum einen den Vorteil, das Lücken, die in Einzelmessungen vorhanden sind geschlossen werden, zum anderen werden Inhomogenitäten, die in einzelnen Fällen vorliegen, herausgefiltert. In den vorliegenden Untersuchungen konnte so eine Windzeitreihe des regionalen Windfeldes in der Deutschen Bucht ermittelt werden. Vor 1945 weist die Reihe (Abbildung 3, unten) einige größere Lücken auf, da in diesem Zeitraum nur die beiden Schiffe Borkumriff und Elbe 1 sowie in den späteren Jahren Elbe 2 im Einsatz waren. Ab 1945 steigt die Anzahl der verfügbaren Messungen deutlich an, wodurch die Zeitreihe bis 1988 überwiegend lückenlos verfügbar ist. Ab 1990 lagen für die Untersuchungen hier nur noch die Messungen der beiden Schiffe Ems und Deutsche Bucht vor, welche, wie aus Abbildung 3 ersichtlich, beide größere Ungereimtheiten enthalten. Diese pflanzen sich daher auch in der Regionalzeitreihe fort. Aus diesem Grund wurde in den vorliegenden Untersuchungen nur auf den Zeitraum 1950-1988 zurückgegriffen. Diese Reihe wurde mit Hilfe der Messungen der Station Scharhörn bis 1999 verlängert. Nach 1999 waren die Unsicherheiten in der Messreihe zu groß (Wechsel des Messinstrumentes) und somit wurde auf eine weitere Verlängerung mit Messdaten verzichtet. Generell sollten die noch vorliegenden Lücken/Inhomogenitäten aber durch die Berücksichtigung weiterer Messungen (synop-

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

tisch und Feuerschiffe) geschlossen/gemindert werden können. Dies wiederum lag außerhalb der Ziele der durchgeführten Untersuchungen und war zeitlich nicht mehr umsetzbar.

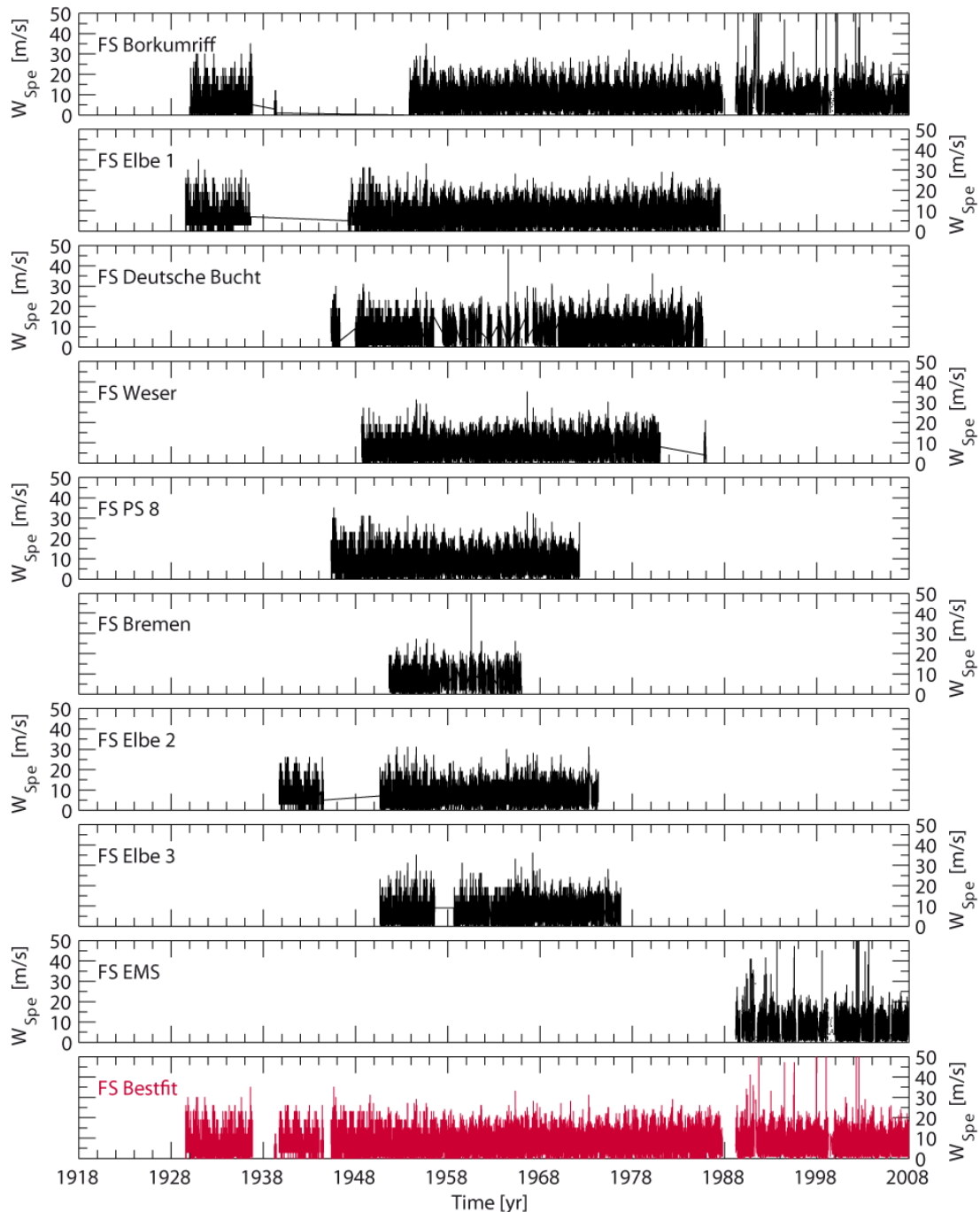


Abbildung 3: Übersicht über die verfügbaren Windmessungen (hier Geschwindigkeit, schwarz) von Feuerschiffdaten in der Deutschen Bucht 1929-2008. Die aus den Einzelmessungen zusammengesetzte Regionalzeitreihe ist in rot dargestellt.

Um die oben erläuterten Probleme bei den meteorologischen Messdaten zu umgehen und den gesamten Aufzeichnungszeitraum des Pegels Cuxhaven mit meteorologi-

schen Daten abdecken zu können, wurde des Weiteren auf Reanalysedaten zurückgegriffen. In diesem Fall wurden die Daten aus der Reanalyse des „20th Century Reanalysis“-Projektes (Compo et al. 2011), frei verfügbar auf der Webseite der NOAA, Boulder, Colorado, verwendet, welche einen lückenlosen Zeitraum zwischen 1871-2010 abdeckt. In der Reanalyse wurden „State-of-the-art“-Modelle der Wetterprognose in Kombination mit der Assimilation von Messdaten des Luftdrucks und der Oberflächentemperatur des Ozeans dazu verwendet, um lückenlose, quasi-homogene Zeitreihen meteorologisch-atmosphärischer Daten auf einem globalen Grid der Auflösung $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ zu liefern. Diese Daten wurden für die in der Studie relevanten Gridpunkte heruntergeladen und mittels Hermite-Interpolation auf Stundenwerte interpoliert. Als Inputdaten wurden hier Daten des Windes (Richtung und Geschwindigkeit), sowie des Luftdrucks gewählt. Die Daten wurden für das Gebiet der Deutschen Bucht bereits kontrovers diskutiert (Krüger et al. 2012), da sie Diskrepanzen zu verfügbaren qualitativ hochwertigen Messreihen enthalten. Diese Diskrepanzen treten vornehmlich und zunehmend bei den Daten vor 1950 auf, da für die früheren Dekaden weniger Messdaten zur Assimilation vorliegen, wobei die Daten nach 1950 eine gute Übereinstimmung zeigen (Krüger et al. 2012). Die größten Diskrepanzen treten vor allem in den drei Dekaden vor 1900 auf (Krüger et al. 2012, Frederick Schenk persönliche Kommunikation), wodurch die vorliegenden Untersuchungen von diesen Diskrepanzen weitgehend unbeeinflusst sein sollten.

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

3 Analyse des Windstaus

Der Windstau ist definiert als das Residuum zwischen beobachtetem Wasserstand und der astronomischen Tide und enthält maßgeblich die meteorologischen Anteile am beobachteten Wasserstand. Diese meteorologischen Anteile lassen sich wiederum in Anteile aus lokalen Wirkungen und Fernwirkungen unterscheiden, wobei sich im Bezug auf die Deutsche Bucht die lokalen Faktoren auf das gesamte Seegebiet der Deutschen Bucht und nicht nur auf den direkten Standort eines Tidepegels beziehen (Annutsch 1978). Die lokalen Faktoren umfassen maßgeblich die Einflüsse des Windes, des Luftdrucks und der Temperatur, während die Fernwirkungen den Einfluss von Fernwellen beschreiben (Gönnert et al. 2010).

Eine vertiefte Analyse des Windstaus ermöglicht Aussagen über unterschiedliche meteorologische Phänomene und ist relevant für diverse praxisnahe Problemstellungen. So werden schon seit Jahrzehnten am BSH die Beziehungen zwischen Windstau und meteorologischen Parametern in Kombination mit Verfahren der synoptischen Meteorologie zur Vorhersage von Sturmfluten verwendet (Müller-Navarra et al. 2003). Des weiteren beinhalten Windstaukurven wertvolle Informationen über landwärts gezogene Stürme, da diese für hohe Wellen und Sturmfluten sorgen können. Die Untersuchung der Sturmaktivität ist von hohem wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Interesse, da Stürme die maßgebliche Naturgefahr in Küstenregionen darstellen. Auch wenn die Auswirkungen von Stürmen auf Küstenregionen gut dokumentiert sind, stellen Langzeitstudien über Veränderungen in der Sturmaktivität aufgrund mangelnden Datenbestandes noch immer eine große Herausforderung dar (Zhang et al. 2000). So sind langzeitliche Windaufzeichnungen zumeist von enormen Inhomogenitäten, verursacht durch wechselnde Aufzeichnungsmethoden, Stationsverlegungen, oder umliegende Baumaßnahmen, geprägt (Weisse und von Storch 2009). Daher wurde schon früh in der Deutschen Bucht auf geostrophische Winde als Proxy für die Sturmaktivität zurückgegriffen (Schmidt und von Storch 1993). Diese werden noch heute als einer der robustesten Proxies angesehen, da die zugrunde liegenden Luftdruckdatensätze überwiegend als homogen und stabil gelten (Krüger und von Storch 2011). Die Tatsache, dass Wasserstandsaufzeichnungen schon über vergleichbar lange Zeiträume in der Deutschen Bucht durchgeführt wurden (seit Mitte des 19. Jahrhunderts) und im Vergleich zu Windmessungen mit sehr stabilen Messmethoden aufgezeichnet werden, lassen vermuten, dass die enthaltenen Windstauzeitreihen ebenfalls als robuster Proxy für die Sturmaktivität herangezogen werden können. Zwar bestehen auch bei den Pegelaufzeichnungen Unsicherheiten durch beispielsweise Wechsel der Messgeräte, oder Baumaßnahmen im Pegelumfeld, etc. jedoch wurden die hier verwendeten Pegel eingehend auf Homogenität überprüft (Jensen et al. 2012).

Aus diesem Grund besteht die Zielstellung des folgenden Abschnitts in der Analyse der langzeitlichen Rekonstruktion des Windstaus am Pegel Cuxhaven. Maßgebliche statistische Eigenschaften sollen erfasst und auf ihre temporäre Entwicklung über unterschiedliche Zeitskalen überprüft werden. Des Weiteren sollen unterschiedliche Ansätze zur Berechnung von Sturmindices überprüft und mit herkömmlichen Indizes aus geostrophischen Winden verglichen werden. Die hierfür verwendete Zeitreihe wurde mit einem neuentwickelten Tool (Müller-Navarra 2013) für die Ermittlung stündlicher Werte der Astronomie am BSH berechnet und an das fwu übergeben. Hierbei sei angemerkt, dass die resultierenden Extremwerte des Windstaus die Werte früherer Analysen insgesamt ein wenig unterschreiten, da diese immer auf Basis des Scheitelstaus oder des sogenannten Skew-Surge gemacht wurden. Der Skew-Surge ist die Differenz zwischen dem beobachteten und dem astronomisch vorausberechneten Scheitelwasserstand ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Eintrittszeiten. Eine Skew-Surge Zeitreihe weist demnach etwas andere Werte als zum Beispiel der klassische Scheitelwindstau auf (McMillan 2011).

3.1 Nichtlineare Interaktion

Bei der Analyse des Windstaus muss im Hinblick auf Bemessungsaufgaben im Küstenwasserbau beachtet werden, dass Abhängigkeiten zwischen der Tide und dem Windstau existieren. Wie oben bereits erwähnt, enthält der Windstau unterschiedliche meteorologische Einflussgrößen, von denen der Wind den größten Anteil ausmacht (Gönnert et al. 2010). Vor allem in Flachwassergebieten spielt der durch die Tide verursachte Wasserstand eine entscheidende Rolle für die Ausprägung eines einzelnen Windstauereignisses. So konnten Horsburgh und Wilson (2007) für Tidepegel entlang der englischen Nordseeküste nachweisen, dass die extremsten Windstauereignisse bevorzugt im ansteigenden Tideast drei bis fünf Stunden vor dem eigentlichen Tidehochwasserstand auftreten. In der Deutschen Bucht treten die höchsten Windstauereignisse bevorzugt zu Zeiten des astronomischen Tideniedrigwassers ein (Gönnert et al. 2010), was darin begründet ist, dass durch die geringeren Wassertiefen die Stauentwicklung bei Niedrigwasser besonders begünstigt wird. Das Windfeld verursacht eine Driftströmung an der Wasseroberfläche, welche mit zunehmender Wassertiefe abnimmt. In Flachwasserbereichen wie der Deutschen Bucht kann sich besonders bei Niedrigwasser die Driftströmung bis in bodennahe Grenzschichten fortpflanzen, wodurch der Rückstromeffekt in den tieferen Schichten gemindert wird (Annutsch 1977). In Anlehnung an die Untersuchungen von Horsburgh und Wilson (2007) werden daher im folgenden Windstauereignisse am Pegel Cuxhaven von 1918 bis 2008 analysiert. Insgesamt werden 20160 Tidehochwasserereignisse hinsichtlich des Auftretens eines maximalen Windstauereignisses ausgewertet. Bei allen Ereignissen trat ein Windstau von mindestens 25 cm auf. In einem Bereich von ± 6 Stunden um ein astronomisches Tidehochwasser herum, wird für jedes Ereignis der maximale

Windstau gesucht. Abbildung 4 zeigt die relativen Häufigkeiten der aufgetreten Windstaumaxima zu der entsprechenden Tidephase. Die Windstauereignisse wurden hierbei in vier Klassen unterschiedlicher Windstaumaxima eingeteilt. Für alle vier Klassen traten die Windstaumaxima am häufigsten in den Phasen des Tideniedrigwassers vor oder nach dem astronomischen Tidehochwasser auf. Für Windstauereignisse größer 150 cm liegen insgesamt rund 59 % aller Windstaumaxima im Bereich von 6 Stunden vor/bzw. nach dem Tidehochwasser. Diese Ergebnisse bestätigen die Resultate von Gönner et al. (2010) und zeigen deutlich auf, dass eine einfache Superposition des maximalen Windstaus mit einem maximalen Tidewasserstand im Bereich der Deutschen Bucht physikalisch als fragwürdig einzuschätzen ist.

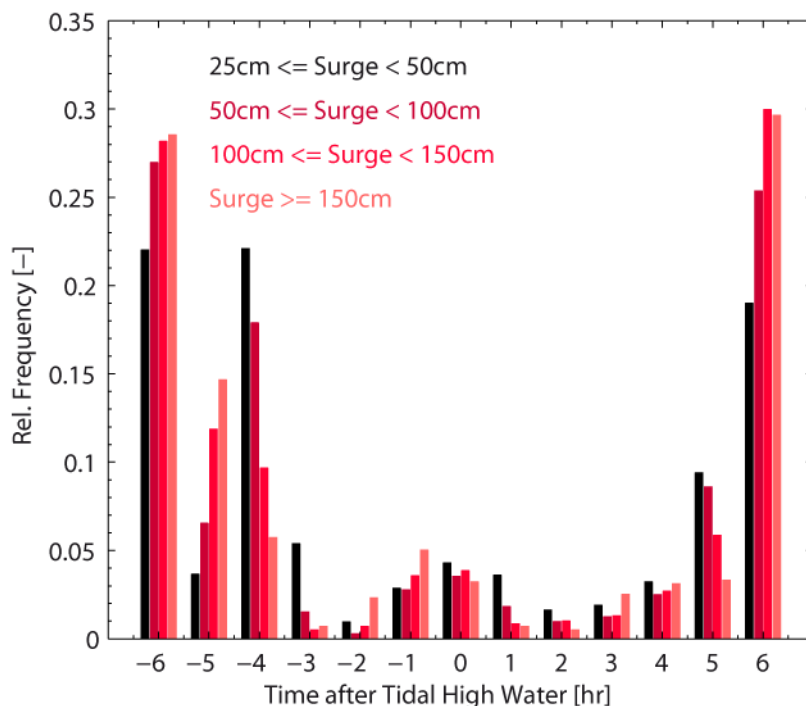


Abbildung 4: Häufigkeiten des Windstaumaximums in Relation zur Tidephase. Es wurden insgesamt 20160 Ereignisse (≥ 25 cm) analysiert.

3.2 Sturmindizes

Durch die hohe Sensitivität von Wasserständen gegenüber den einwirkenden atmosphärischen Kräften, enthalten Wasserstandsdaten wichtige Informationen über die Häufigkeit und Intensität der Sturmaktivität. Die Tatsache, dass Tidepegelaufzeichnungen bereits seit bis zu 300 Jahren existieren, machen sie zu einem reichhaltigen Archiv mit wichtigen Informationen über Langzeittrends und mehrdekadischer Variabilität. Hierbei besteht jedoch das Problem, dass der hohe deterministische Anteil der Tiden in den Wasserständen einzelne wichtige Sturmereignisse überdecken kann. Wie aus Abbildung 4 ersichtlich, treten Windstaumaxima bevorzugt zu Zeiten des

astronomischen Tideniedrigwassers auf. Auch wenn diese Ereignisse für den Küstenschutz und die Sturmflutsicherheit von untergeordneter Bedeutung sind und die Sicherheit der Schutzbauwerke nicht gefährden, sind sie dennoch wichtige Informationsquelle für die generelle Sturmaktivität. Für die Filterung extremer Sturmereignisse aus Wasserstandsdaten muss demnach der Einfluss der Tide berücksichtigt werden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5 beispielhaft dargestellt. Die Abbildung zeigt die Wasserstände und Windstauentwicklung am Pegel Cuxhaven im Januar 1990. Als Grenzwert für die Filterung wurde hier der Mittelwert plus die dreifache Standardabweichung angesetzt. Während für den Gesamtwasserstand nur ein einzelnes Ereignis in diesem Monat als extrem einzustufen ist, ergeben sich für die Windstauzeitreihe gleich vier Extremereignisse, von den jedoch drei mit niedrigen Tidewasserständen zusammenfallen. Die fehlenden Ereignisse bei Betrachtung der Gesamtwasserstände würden also eine Langzeitanalyse der Sturmaktivität verfälschen. Die Windstauzeitreihen hingegen enthalten die vollständige Information sowohl über landwärts als auch seewärts gerichtete Sturmereignisse. Die Informationen über landwärts gefallene Stürme sind für den Küstenschutz von enormer Bedeutung, während seewärts gerichtete Stürme Bedeutung für den Schiffsverkehr und die Binnenentwässerung in der Deutschen Bucht haben.

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

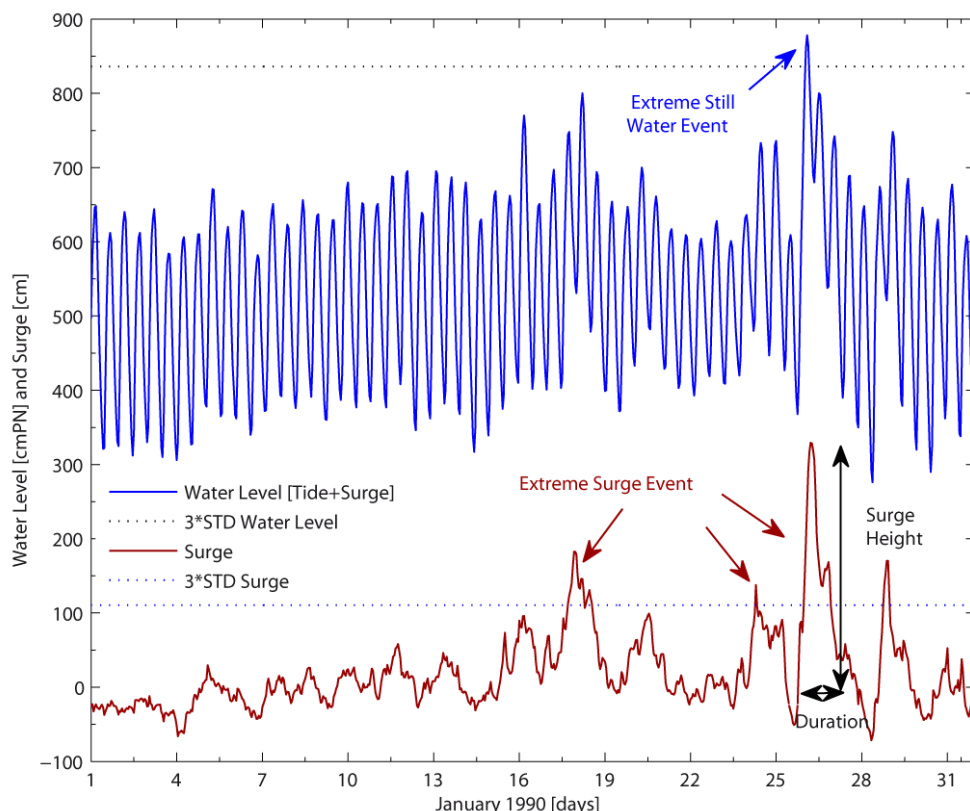


Abbildung 5: Wasserstand und Windstau am Pegel Cuxhaven im Januar 1990. Das Bild verdeutlicht die Unterschiede bei der Auswahl eines Kollektivs für Extremwertuntersuchungen.

Die Auswertung der Sturmhäufigkeiten wird über unterschiedliche Ansätze und Methoden vorgenommen. Begonnen wird an dieser Stelle mit der Betrachtung der 100 höchsten gemessenen Windstauereignisse (Abbildung 6 und Tabelle 1). Die Ereignisse wurden aus den Stundenwerten extrahiert und enthalten demnach nicht alle absolut aufgetretenen Maxima, da diese aufgrund der Auflösung der Daten verloren gehen. Hierbei sei jedoch angemerkt, dass die hiermit verbundenen Unsicherheiten bei einer Auflösung von Stunden als eher gering einzustufen sind. Zur Clusterung der Einzelereignisse wurde ein Grenzwert von 36 Stunden gewählt. Dieser stellt sicher, dass die gewählten Ereignisse aus voneinander unabhängigen Tiefdruckgebieten entstammen und damit keine gemeinsame Genese aufweisen. Das höchste Windstauereignis (418 cm) trat in Cuxhaven am 23.02.1967 in den frühen Abendstunden gemeinsam mit dem Tideniedrigwasser auf, wodurch kein außergewöhnlich hohes Sturmflutereignis zustande kam. Die Betrachtung der saisonalen Verteilung dieser 100 Ereignisse zeigt zudem, dass von den höchsten Ereignissen über 95 % in den Monaten Oktober bis März aufgetreten sind (Abbildung 6b). Den größten Anteil mit rund 26 % aller Ereignisse hat hierbei der Januar. In Abbildung 6a sind zudem die 100 Ereignisse für fünf gleich große Bereiche je 18,2 Jahre ausgezählt worden. Die Auszählung ergibt insgesamt eine relativ gleichmäßige temporäre Entwicklung bezüglich der Häufigkeiten extremer Windstauereignisse, wobei in den letzten beiden Phasen (36,4 Jahre) 50 % aller Top 100-Ereignisse aufgetreten sind. Dies deutet auf eine leichte Tendenz zu häufigeren landwärts gezogenen Stürmen hin, die aber unter Berücksichtigung der recht hohen dekadischen Variabilität nicht als außergewöhnlich zu bezeichnen ist.

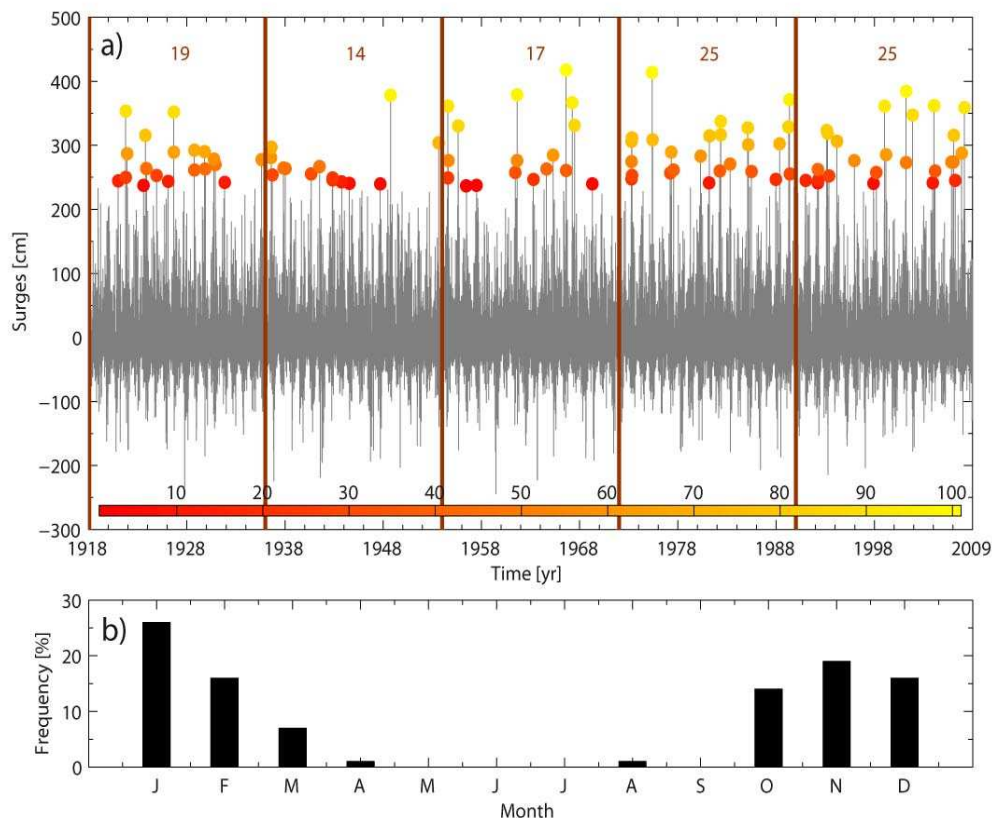


Abbildung 6: a) Windstauzeitreihe am Pegel Cuxhaven 1918-2008 mit Kennzeichnung der 100 größten Windstauereignisse über farbige Punkte. Die Farbskala definiert den Rang eines jeden Ereignisses. Zur Clusterung der Events wurde ein Grenzwert von 36 Stunden gewählt. Die Zeitreihe ist in fünf Bereiche von je 18,2 Jahren eingeteilt, für die jeweils die Anzahl beobachteter Top 100-Ereignisse ausgezählt wurde. Von links nach rechts traten jeweils 19, 14, 17, 25 und 25 Ereignisse in den jeweiligen Zeitfenstern auf. b) Häufigkeiten der Top 100 Ereignisse je Monat für den Zeitraum 1918-2008.

Tabelle 1: Top 100 Windstauereignisse am Pegel Cuxhaven auf Basis von Stundenwerten von 1918-2008. Zur Clusterung wurde ein Grenzwert von 36 Stunden gewählt

Top 100 Windstauereignisse am Pegel Cuxhaven 1918-2008					
Rang	Datum	Stau [cm]	Rang	Datum	Stau [cm]
1	23.02.1967 19:00	418	51	12.01.2007 02:00	274
2	03.01.1976 09:00	414	52	23.02.2002 04:00	273
3	26.02.2002 19:00	384	53	15.01.1984 03:00	271
4	16.02.1962 22:00	379	54	17.01.1931 07:00	270
5	10.02.1949 05:00	378	55	18.10.1941 23:00	267
6	26.02.1990 20:00	371	56	29.01.1938 19:00	265
7	17.10.1967 19:00	367	57	03.04.1938 21:00	264
8	08.01.2005 18:00	362	58	19.12.1923 01:00	264
9	03.12.1999 20:00	362	59	13.01.1930 10:00	263
10	23.12.1954 17:00	361	60	13.02.1965 18:00	263
11	01.03.2008 14:00	359	61	23.01.1993 01:00	262
12	23.10.1921 13:00	354	62	17.11.1928 08:00	261
13	10.10.1926 10:00	352	63	26.03.1978 09:00	261
14	27.10.2002 23:00	347	64	01.03.1967 00:00	261
15	01.02.1983 23:00	338	65	16.12.1982 08:00	260
16	15.01.1968 17:00	331	66	12.02.2005 19:00	260
17	21.01.1956 12:00	330	67	25.03.1986 07:00	259
18	26.01.1990 05:00	329	68	05.02.1999 05:00	257
19	06.11.1985 12:00	327	69	06.12.1961 07:00	257
20	20.12.1993 01:00	324	70	12.11.1977 09:00	257
21	28.01.1994 10:00	319	71	06.12.1940 21:00	255
22	18.01.1983 10:00	316	72	28.02.1990 11:00	255
23	18.01.2007 20:00	316	73	01.12.1936 14:00	254
24	16.11.1923 14:00	316	74	14.12.1973 02:00	253
25	24.11.1981 09:00	315	75	03.01.1925 02:00	253
26	06.12.1973 21:00	312	76	13.03.1994 22:00	252
27	21.01.1976 02:00	309	77	02.11.1921 01:00	250
28	10.01.1995 08:00	307	78	22.12.1954 05:00	249
29	19.11.1973 18:00	306	79	13.02.1943 13:00	249
30	16.01.1954 06:00	304	80	13.11.1973 10:00	247
31	14.02.1989 13:00	302	81	14.10.1963 05:00	247
32	06.12.1985 11:00	301	82	08.10.1988 06:00	247
33	27.10.1936 18:00	297	83	16.02.1943 03:00	246
34	24.11.1928 05:00	292	84	21.02.1993 08:00	246
35	12.12.1929 20:00	290	85	18.03.2007 19:00	245
36	31.12.1977 02:00	289	86	18.10.1991 16:00	245
37	12.10.1926 14:00	289	87	19.01.1921 14:00	244
38	09.11.2007 12:00	288	88	09.03.1926 23:00	243
39	18.12.1921 10:00	287	89	26.01.1944 08:00	243
40	30.01.2000 03:00	285	90	07.01.1932 04:00	242
41	02.11.1965 01:00	285	91	21.11.1981 03:00	241
42	01.01.1981 15:00	283	92	18.11.2004 08:00	241
43	18.10.1936 14:00	281	93	24.01.1993 18:00	241
44	23.11.1930 15:00	278	94	07.11.1944 22:00	241
45	20.10.1935 00:00	277	95	25.10.1998 22:00	240
46	29.10.1996 22:00	276	96	06.01.1948 01:00	240
47	13.01.1955 11:00	276	97	10.11.1969 05:00	240
48	12.02.1962 21:00	276	98	30.08.1923 22:00	238
49	16.11.1973 03:00	274	99	08.12.1957 21:00	237
50	01.11.2006 06:00	274	100	27.11.1956 14:00	236

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Berechnung von hohen Perzentilen des Windstaus am Pegel Cuxhaven. In Abbildung 7a sind alle gemessenen Windstauwerte von 1918-2008 als Histogramm, sowie vier hohe (95., 98., 99. und 99,9.) Perzentile aufgetragen. In Abbildung 7b dagegen ist der zeitliche Verlauf der 4 annuell berechneten Perzentile dargestellt. Keine der Zeitreihen weist einen signifikanten Langzeittrend auf. Jedoch lässt sich deutlich eine ausgeprägte dekadische Variabilität beobachten, welche Ähnlichkeiten mit den bekannten dekadischen Schwankungen der geostrophischen Winde aufweisen (Schmidt und von Storch 1993, Weisse und von Storch 2009).

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

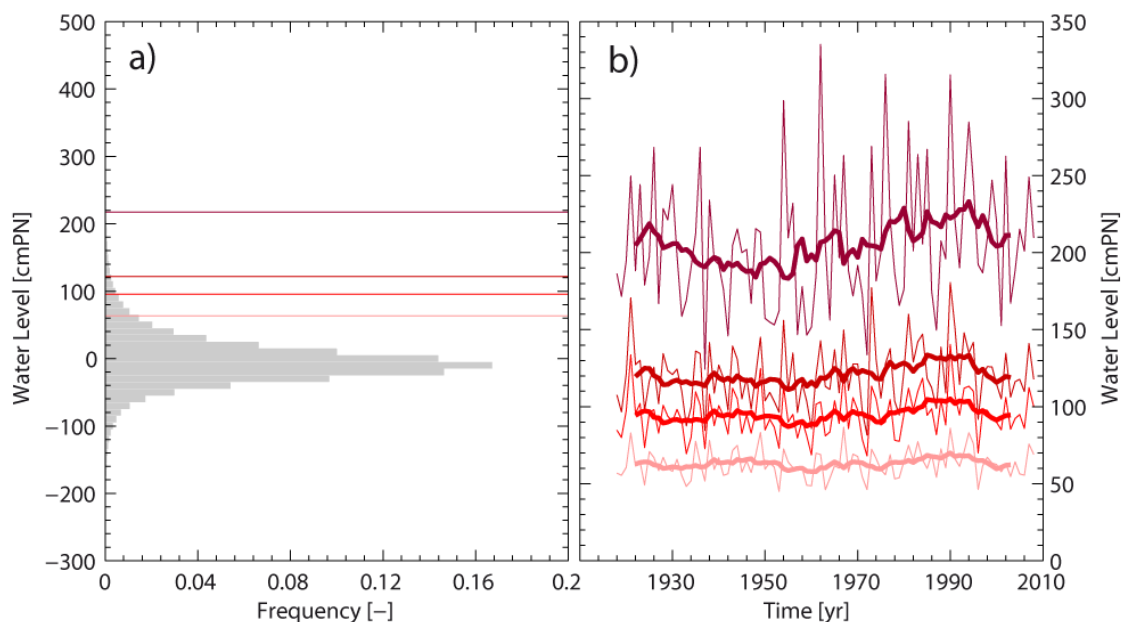


Abbildung 7: a) Histogramm (graue Balken) des stündlichen Windstaus sowie die 95, 98, 99, 99,9 Perzentile (farbige Linien) am Pegel Cuxhaven 1918-2008. b) Zeitliche Entwicklung der 4 Perzentile als Jahreswerte (dünne Linie), sowie dem zugehörigen 10-jährigen gleitenden Mittel.

Neben diesen klassischen Verfahren, werden im Folgenden die historischen Windstauzeitreihen des Pegels Cuxhaven von 1918 bis 2008 dazu genutzt, weitere alternative Sturmindices zu berechnen und auszuwerten, die bisher an den Pegeln in der Deutschen Bucht noch keine Anwendung gefunden haben. Die Indizes basieren auf den Ansätzen, die in Zhang et al. (2000) für Pegel entlang der nordamerikanischen Küste angewendet wurden. Diese Ansätze integrieren neben den absoluten Spitzenwerten des Windstaus auch die Verweildauer einzelner Ereignisse, welche ebenfalls einen gewichtigen Einfluss auf bemessungsrelevante Fragestellungen im Küstenwasserbau hat (Führböter 1976, Jensen et al. 2012). Insgesamt wurden drei unterschiedliche Indizes berechnet (Zhang et al. 2000), welche jeweils zwei ausgewählten Grenzwerten (95. und 99. Perzentil 1918-2008) für den gesamten Aufzeichnungszeitraum selektiert und dann jahresweise analysiert wurden:

1. Count: Anzahl der extremen Windstauereignisse in einer definierten Zeitspanne ($> 95./99.$ Perzentil).

2. Duration: Verweildauer der detektierten Windstauereignisse in einer definierten Zeitspanne ($> 95./99.$ Perzentil).
3. Intensity: Intensität der detektierten Windstauereignisse in einer definierten Zeitspanne. Die Intensität ist definiert über das Integral des Windstaus über einem definierten Grenzwert ($> 95./99.$ Perzentil) und kombiniert somit die Windstauspitze mit der Verweildauer.

Zur Clusterung der Datensätze wurde auch hier wieder ein Grenzwert von 36 Stunden gewählt, um zu vermeiden, dass Ereignisse mit derselben Sturmgenese getrennt voneinander analysiert werden. Die Zeitreihen der jährlichen Sturmindizes (inklusive der Perzentile des geostrophischen Windes), sowie ihre linearen und nichtlinearen Trends sind in Abbildung 8 und Tabelle 2 dargestellt. Keiner der Indizes weist über den Aufzeichnungszeitraum einen signifikanten Langzeittrend auf. Es lässt sich jedoch festhalten, dass alle berechneten Lineartrends ein positives Vorzeichen aufweisen. Dies steht zunächst im Gegensatz zu den Untersuchungen der Windproxies aus geostrophischen Winden (Schmidt und von Storch 1993, Weisse und von Storch 2009, vergleiche auch Tabelle 2), welche neben einer ausgeprägten dekadischen Variabilität eine eher negative Langzeitentwicklung aufweisen. Eine mögliche Begründung lässt sich in den dominant vorherrschenden Windrichtungen finden. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts konnten mehrere Autoren signifikante Veränderungen in den Windrichtungen hin zu vermehrten Südwest- bis Westwindlagen über der südöstlichen Nordsee nachweisen (Siegismund und Schrum 2001, Dangendorf et al. 2013b). Diese Veränderungen sind in den bisherigen Analysen der Proxies der geostrophischen Winde nicht enthalten, da diese sich einzig und allein auf die Geschwindigkeiten beziehen. Für die Windstauentwicklung entlang der Küste sind jedoch vor allem auch die Windrichtungen von entscheidender Bedeutung. Während lokal in Cuxhaven zwar vor allem Winde aus nordwestlicher Richtung die größte Stauwirkung haben, sind es aber auch Winde aus südwestlicher bis westlicher Richtung die die Wassermassen aus der Nordsee in die Deutsche Bucht hinein transportieren und somit für einen erhöhten Windstau sorgen. Neben den linearen Entwicklungen sind alle Indexzeitreihen von einem hohen Anteil dekadischer Variabilität geprägt. So zeigt der Index Count 4 Phasen erhöhter Intensität (1920er, 1940er, 1960er und 1990er) und 4 Phasen geringerer Intensität (1930er, 1950er, 1970er und um 2000). Dabei schwanken die Werte zwischen 3 und 22 (je nach Grenzwert und Periode) Extremereignissen pro Jahr, wobei das Jahr 1990 mit 18 Ereignissen die höchste und das Jahr 1996 mit 3 Extremereignissen die geringste Windstauaktivität verzeichnen. Die Verweilzeiten sowie die Intensität der extremen Windstauereignisse zeigen insgesamt eine etwas geringere dekadische Variabilität und sind beide durch eine Phase verstärkter Intensität in den 1980er und 1990er Jahren geprägt. Dies gilt sowohl für die Zeitreihen maximaler Intensität und Verweilzeit als auch die Jahressummen (Summe aller Grenzwertüberschreitungen, nicht abgebildet) beider Indizes. In der Summe lässt sich demnach zur Zeit aus den Sturmindizes aus Windstauzeitreihen keine besondere Langzeitveränderung aber eine ausgeprägte dekadische Variabilität detektieren. Dies steht im Ein-

klung mit Untersuchungen zu Sturmhäufigkeiten anhand herkömmlicher Sturmindices auf Basis von Luftdruckmessungen (Schmidt und von Storch 1993, Alexandersson et al. 1998, 2000, Barring and von Storch 2004, Matualla et al. 2008, Hannah et al. 2008, Wang et al. 2008, 2011).

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

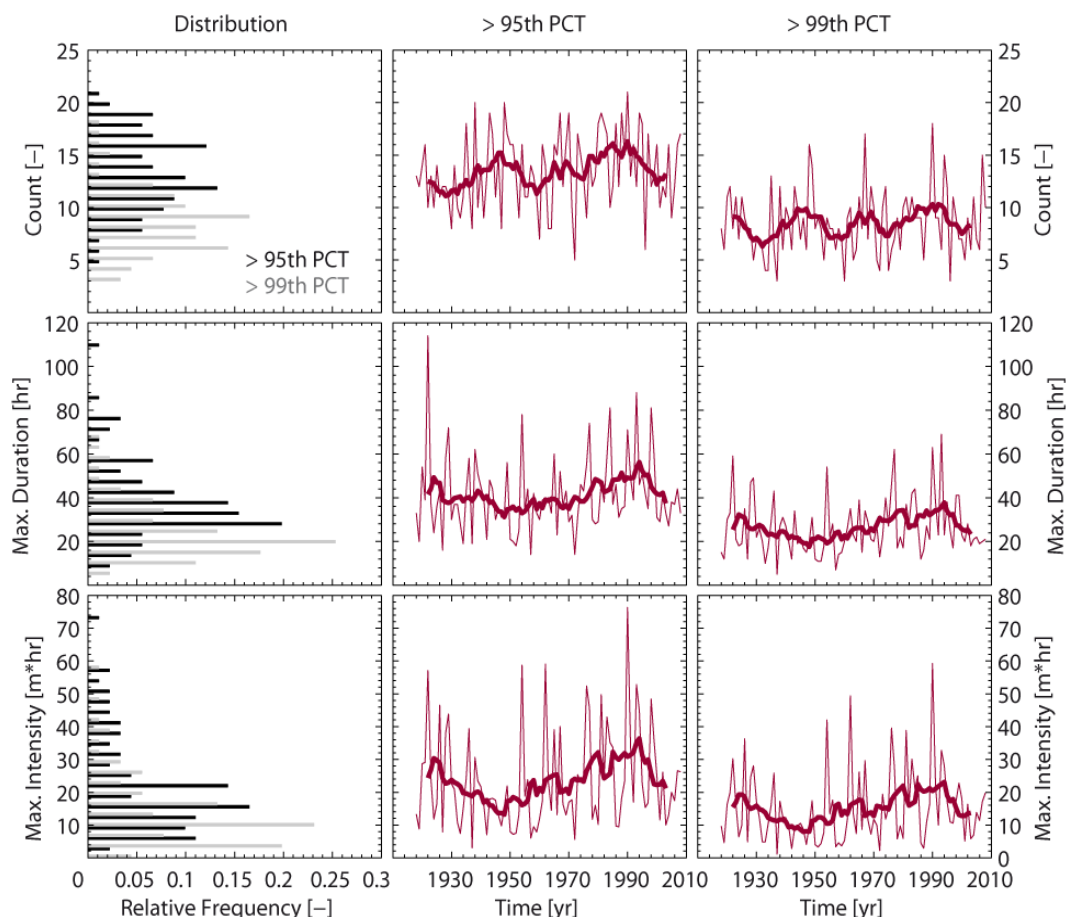


Abbildung 8: Darstellung der drei unterschiedlichen „Storminess“-Indizes Grenzwertüberschreitung (Count, oben), Maximale jährliche Verweilzeit (Max. Duration, mitte), sowie der Intensität (Intensity, unten). Im rechten Teil der Grafik sind jeweils die Histogramme der Indizes für Grenzwerte größer den 95. bzw. 99. Perzentil dargestellt, während in der Mitte und rechts der zeitliche Verlauf der zugehörigen Indizes mitsamt eines 10-jährigen gleitenden Mittels aufgetragen ist.

Tabelle 2: Lineartrends der Sturmindizes aus Windstau (WS) > 95./99. Perzentil am Pegel Cuxhaven 1918-2008 mit den zugehörigen 2σ -Standardfehlern, sowie die zugehörigen Trends im 95./99. Perzentil der geostrophischen Windgeschwindigkeiten.

Grenzwert	Lineartrend der Sturmindizes von 1918-2008		
	Count [Einheit/a]	Max. Verweilzeit [hr/a]	Max. Intensität [(hr*m)/a]
>95. Perzentil WS	$0,03 \pm 0,03$	$0,05 \pm 0,14$	$0,07 \pm 0,11$
>99. Perzentil WS	$0,01 \pm 0,02$	$0,06 \pm 0,10$	$0,05 \pm 0,09$
Perzentil	Geostrophischer Wind [m/(s*yr)]		
95	$-0,01 \pm 0,01$		
99	$-0,03 \pm 0,02$		

4 Das Windstaumodell

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

4.1 Allgemeines und Aufbau

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln angesprochen beinhaltet der gemessene Windstau Informationen über unterschiedliche physikalische Prozesse, welche für Wasserstandschwankungen sorgen. Die Kenntnis über diese Wirkungsketten ermöglicht unter der Verwendung hydrodynamisch-numerischer Modelle oder statistisch-empirischer Methoden eine approximative Beschreibung des Windstauphänomens. In dem folgenden Kapitel wird auf ein statistisch-empirisches Verfahren zurückgegriffen, welches ermöglicht historische Windstauereignisse mit großer Genauigkeit zu rekonstruieren. Das entwickelte Modell basiert auf den rechnerischen Ansätzen der empirisch-statistischen Windstauformeln von Müller-Navarra und Giese (1999), welche auch im operationellen Vorhersagedienst des BSH Anwendung finden. Das Modell berücksichtigt unterschiedliche Komponenten, die zu der Ausprägung eines Windstauereignisses beitragen.

Die erste und wichtigste Komponente ist der Wind. Aufbauend auf den Formeln von Müller-Navarra und Giese (1999) werden 4 Terme unter Berücksichtigung des quadratischen und kubischen Windstress in die Betrachtung integriert. Korrelationsanalysen zeigen eine verzögerte Wirkung des Windes von bis zu 3 Stunden. Diese decken sich mit früheren Untersuchungen von Schulz (1920) und Müller-Navarra et al. (2003). Um diese verzögerte Komponente in der Modellierung zu berücksichtigen, werden zusätzlich weitere 4 Windstressterme mit dem zugehörigen Verzögerungsterm in das Modell mit aufgenommen. Die zweite Komponente ist der lokale Luftdruck, der über den inversen barometrischen Effekt (IBE) hydrostatisch auf die Wasseroberfläche wirkt. Bei niedrigem (hohem) Luftdruck hebt (senkt) sich die Wassersäule. Als dritte Komponente werden Fernwellen in die Analyse integriert. Müller-Navarra und Giese (1999) berücksichtigen diesen Anteil approximativ über den Windstau am Pegel Aberdeen am nordwestlichen Rand der Nordsee. Da der Pegel Aberdeen keine langjährigen lückenfreien Pegelaufzeichnungen vorliegen hat und das Hauptziel in den vorliegenden Untersuchungen in der Ableitung statistischer Zusammenhänge zwischen Atmosphäre und Ozean liegt, wird dieser Anteil über Luftdruck und Windzeitreihen nördlichen Rand der Nordsee aus der 20CRv2 (Gridpunkt zwischen Schottland und den Shetland Inseln) approximiert. Hierfür werden dieselben 4 Terme des Windes sowie der Term des Luftdrucks wie für die lokale Wirkung mit einer Vorlaufzeit von 15 Stunden berücksichtigt. Dies ist in etwa die Zeit, die eine Fernwelle benötigt um von Aberdeen nach Cuxhaven fortzuschreiten (Gönnert et al. 2010). In der Summe ergeben sich die folgenden 14 Terme:

$$g_1(t) = W_{Spe,Cux}(t)^2 * \cos(W_{dir,Cux}(t)) \quad (4)$$

$$g_2(t) = W_{Spe,Cux}(t)^2 * \sin(W_{dir,Cux}(t)) \quad (5)$$

$$g_3(t) = W_{Spe,Cux}(t)^3 * \cos(W_{dir,Cux}(t)) \quad (6)$$

$$g_4(t) = W_{Spe,Cux}(t)^3 * \sin(W_{dir,Cux}(t)) \quad (7)$$

$$g_5(t) = W_{Spe,Cux}(t-3)^2 * \cos(W_{dir,Cux}(t-3)) \quad (8)$$

$$g_6(t) = W_{Spe,Cux}(t-3)^2 * \sin(W_{dir,Cux}(t-3)) \quad (9)$$

$$g_7(t) = W_{Spe,Cux}(t-3)^3 * \cos(W_{dir,Cux}(t-3)) \quad (10)$$

$$g_8(t) = W_{Spe,Cux}(t-3)^3 * \sin(W_{dir,Cux}(t-3)) \quad (11)$$

$$g_9 = SLP_{Cux}(t) \quad (12)$$

$$g_{10}(t) = W_{Spe,Abse}(t-15)^2 * \cos(W_{dir,Abse}(t-15)) \quad (13)$$

$$g_{11}(t) = W_{Spe,Abse}(t-15)^2 * \sin(W_{dir,Abse}(t-15)) \quad (14)$$

$$g_{12}(t) = W_{Spe,Abse}(t-15)^3 * \cos(W_{dir,Abse}(t-15)) \quad (15)$$

$$g_{13}(t) = W_{Spe,Abse}(t-15)^3 * \sin(W_{dir,Abse}(t-15)) \quad (16)$$

$$g_{14}(t) = SLP_{Abse}(t-15) \quad (17)$$

$$g_{14}(t) = SLP_{Abse}(t-15) \quad (18)$$

Diese Terme gehen als unabhängige Prädiktoren in ein lineares multiples Regressionsmodell ein, indem der Windstau als abhängige Variable eingeht:

$$\Delta h(t) = \sum_{i=0}^i a_i * g_i(t) + \varepsilon \quad (19)$$

Hierbei stellt Δh den Windstau dar, während a_i und g_i die Regressionskoeffizienten beziehungsweise die unterschiedlichen Windstauprädiktoren beinhalten. Die Koeffi-

zienten werden so bestimmt, dass die Summe der quadratischen Abweichungen minimal wird. Die Regressionskoeffizienten werden des weiteren getrennt für Onshore/Offshore-Winde ermittelt (Müller-Navarra und Giese 1999). Für den Pegel Cuxhaven werden alle Winde aus der Richtungsklasse $200^\circ \leq W_{dir} < 20^\circ$ als Onshore-Winde definiert, während die Klasse der Offshorewinde alle Winde innerhalb eines Korridors $20^\circ \leq W_{dir} < 200^\circ$ beinhaltet (Müller-Navarra und Giese 1999).

Wie in Kapitel 3 bereits erläutert besteht in der Deutschen Bucht eine Interaktion zwischen der astronomischen Tide und dem darauf aufsattelnden Windstau. Um diese Interaktion adäquat zu berücksichtigen wird das statistische Modell in Abhängigkeit des astronomisch vorausberechneten Wasserstandes angewendet. Dabei wird die astronomische Tide in unterschiedliche Höhenstufen eingeteilt. Für jede dieser Höhenstufen wird dann dem zeitgleichen Windstau der zugehörige Wind-/Luftdruckwert zugewiesen. So erhält man für jede Höhenstufe eine zugehörige Windstau- bzw. Wind-/Luftdruckzeitreihe, mit denen dann jeweils eigene Regressionskoeffizienten ermittelt werden (Abbildung 9). Dies hat den Vorteil, dass zum Beispiel für die Betrachtung zukünftiger Entwicklungen potentielle Änderungen im MSL in das Windstaumodell integriert werden können.

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

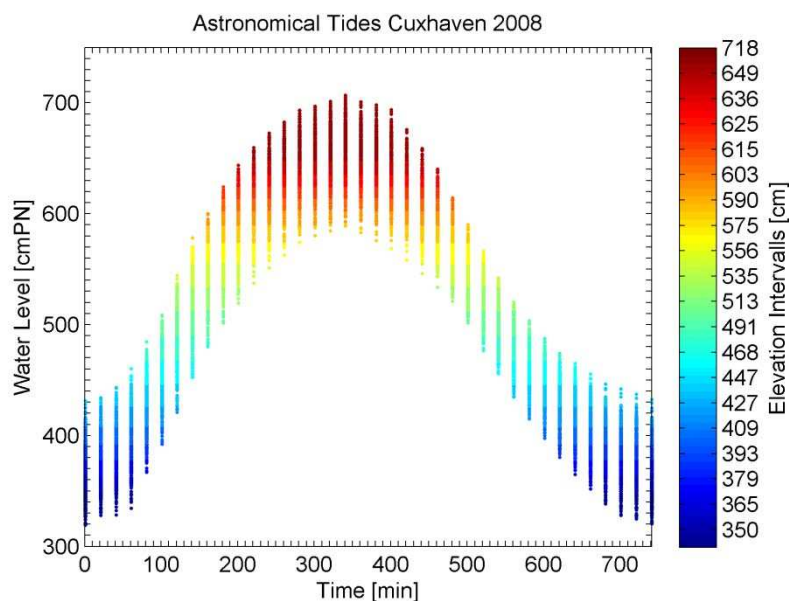


Abbildung 9: Darstellung der astronomischen Tide über das Jahr 2008 am Pegel Cuxhaven. Die Farbskalierung gibt unterschiedliche Überschreitungsklassen an, welche zur Berücksichtigung der Interaktion zwischen Tide und Windstau verwendet werden.

Mit Hilfe des Regressionsmodells aus Gleichung 20 lassen sich die Windstauzeitreihen am Pegel Cuxhaven für den gesamten Untersuchungszeitraum 1918 bis 2008 rekonstruieren. Um die Qualität der Rekonstruktion zu überprüfen, werden unterschiedliche Gütekriterien berechnet. Das erste Gütekriterium ist das Bestimmtheits-

maß, welches auch das Quadrat des Pearson Korrelationskoeffizienten darstellt. Es lässt sich über die Formel

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (21)$$

berechnen, wobei O_i und P_i die einzelnen Mess- beziehungsweise vorhergesagten Modellwerte darstellen. \bar{O} und \bar{P} hingegen sind jeweils die Stichprobenmittelwerte. Das Bestimmtheitsmaß beschreibt das Verhältnis der Kovarianz und den multiplizierten Standardabweichungen von Mess- und Modellwerten und kann Werte zwischen null und eins annehmen. Der Wert null deutet auf keine signifikante Beziehung zwischen beiden Größen hin, während der Wert eins eine perfekte Übereinstimmung bei der Zeitreihen postuliert. Der Nachteil dieses Kriteriums besteht darin, dass einzig und allein die Fluktuationen der Messdaten in die Überprüfung eingehen und daher konstante Über- und Unterschätzungen nicht erfasst werden können. Daher ein kann #Modell, welches systematisch alle Werte über- oder unterschätzt, trotzdem eine Korrelation von eins beinhalten (Krause et al. 2005).

Daher wird an dieser Stelle zusätzlich auf den Index of Agreement d und den quadratischen Fehler (RMSE) zurückgegriffen. Der Index d wurde von Willmot (1981) entwickelt, um die Schwächen des Bestimmtheitsmaßes auszugleichen. Er lässt sich errechnen über

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (22)$$

und nimmt ebenfalls Werte zwischen null und eins an. Der RMSE ist die Standardabweichung der Residuen zwischen Mess- und Modellwert und wird beschrieben über

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}. \quad (23)$$

4.2 Sensitivitätsstudien zur Interaktion zwischen Tide und Windstau

Um eine geeignete Einteilung der Höhenstufen zu finden wurden Sensitivitätsstudien durchgeführt. In diesen Sensitivitätsstudien wurde die Anzahl der Höhenstufen stetig erhöht. So wurde in einem ersten Versuch auf eine Einteilung der astronomischen

Tidekurve in unterschiedliche Höhenstufen verzichtet. In einem zweiten Durchgang wurde die Tidekurve in zwei Bereiche größer und kleiner dem Median eingeteilt. In einem dritten Durchgang wurde die Tidekurve in drei gleichgroße Höhenstufen eingeteilt. Dieser Vorgang wurde bis zu einer Einteilung der Tidekurve in 160 Höhenstufen immer wieder wiederholt. Für jeden Durchgang wurden unterschiedliche Gütemaße zwischen Mess- und Modellwert berechnet. Die Ergebnisse dieser Simulationen sind in Abbildung 10a exemplarisch für den Pegel Cuxhaven visualisiert. Am Beispiel des Bestimmtheitsmaß zeigt sich deutlich, dass eine Erhöhung der Anzahl gewählter Höhenstufen zu einer Optimierung der erklärten Variabilität führt. Simultan wird mit ansteigender Anzahl an Höhenstufen der RMSE minimiert. Die Ergebnisse verdeutlichen somit, dass durch die Berücksichtigung der Interaktion von Tide und Windstau in Form von unterschiedlichen Höhenstufen im Regressionsmodell, die Robustheit des Regressionsmodelles deutlich zunimmt. Während ohne die Berücksichtigung dieser Interaktion etwa 80 % der Variabilität erklärt werden und die modellierte Windstaukurve einen RMSE von ca. 16,6 cm aufweist, wird bei Berücksichtigung von 160 Höhenstufen der RMSE auf ca. 15,9 cm minimiert und die erklärte Variabilität auf ca. 82 % maximiert. Neben diesen klassischen Gütekriterien wurden zusätzlich noch die Differenzen zwischen Perzentilen des gemessenen und des modellierten Windstaus für jede Höhenstufe ermittelt. Für das erste sowie das 99. Perzentil sind die Ergebnisse in Abbildung 10b veranschaulicht. Auch hier zeigt sich die Tendenz, dass die Unter-/Überschätzung extrem hoher/niedriger Perzentile durch die Verwendung mehrerer Höhenstufen etwas reduziert wird. Die Wahl der endgültigen Anzahl der Höhenstufen hängt zum einen von der subjektiven Entscheidung des Modellierers ab, der entscheiden muss in wie fern das Ergebnis den Mehraufwand rechtfertigt, zum anderen besteht natürlich auch eine Abhängigkeit zur verfügbaren Zeitreihenlänge. Im Folgenden haben wir uns für die Wahl von 160 Höhenstufen entschieden, um die größtmögliche Genauigkeit zu erlangen.

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

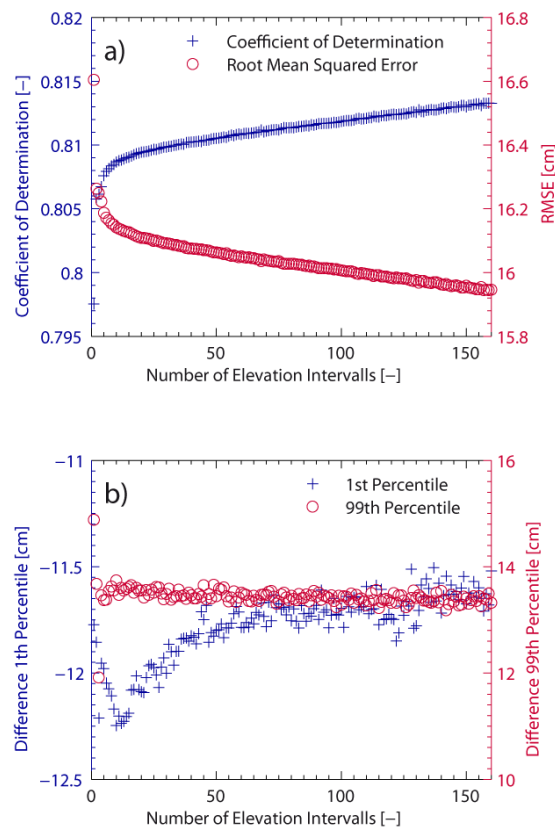


Abbildung 10: Ergebnis der Sensitivitätsstudien mit Hilfe der 20CR und dem Windstau am Pegel Cuxhaven über die Periode 1950-2008. a) RMSE (rot) und Bestimmtheitsmaß (blau) in Abhängigkeit der gewählten Höhenklassen zur Berücksichtigung der Interaktion zwischen Tide und Windstau. b) Differenzen zwischen gemessenen und modellierten Perzentilen des Windstaus (blau 1. Perzentil, rot 99. Perzentil).

4.3 Vergleich Messdaten versus Reanalyse

Wie vorangehend bereits beschrieben wird das Windstaumodell durch Reanalysedaten des Windes und Luftdrucks angetrieben. Diese Daten haben drei maßgebliche Nachteile:

1. Die Reanalysedaten liegen nur in einer Auflösung von dreistündigen Werten vor. Zwischenwerte müssen daher interpoliert werden. Hierdurch kann es passieren, dass vor allem während Extremereignissen aufgetretene Spitzenwerte nicht erfasst sind und somit im Windstaumodell zu einer Unter- bzw. Überschätzung extrem hoher bzw. niedriger Werte führen.
2. Die Reanalysedaten basieren auf einem Mittelwert eines Ensembles aus insgesamt 20 Modellläufen, die zu einem sogenannten Ensemble-Mean gemittelt wurden. In einzelnen Modellläufen kann es vorkommen, dass einzelne Extremereignisse nicht richtig bzw. unvollständig erfasst werden. Durch den Mittelungsprozess kann es demnach passieren, dass einzelne

Spitzenwerte etwas niedriger/höher als gemessen ausfallen. Diese Unsicherheiten pflanzen sich im Windstaumodell entsprechend fort.

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

3. Die Reanalysedaten liegen auf einem globalen Grid der Auflösung $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ vor. Als lokale Windkomponente wird der nächstgelegene Gridpunkt zum Pegel Cuxhaven verwendet. Dieser liegt aber einige Kilometer weit draußen in Mitten der Deutschen Bucht.

Um die Unsicherheiten, die mit diesen oben genannten Punkten einhergehen besser erfassen zu können, wird für einen Zeitraum, für den sowohl Mess- als auch Reanalysedaten vorliegen, die lokale Windkomponente durch Messdaten der Station Scharhörn bzw. der Feuerschiffmessungen ersetzt und mit den Ergebnissen auf Basis reiner Reanalysedaten verglichen. Als Vergleichsperiode wird der Zeitraum von 1976 bis 1988 gewählt, da für diesen qualitativ hochwertige Messwerte der Station Scharhörn und der Feuerschiffe vorliegen. Wie oben bereits erwähnt unterscheiden sich die Modellläufe nur durch die Inputvariable des lokalen Windes, daher: Die Koeffizienten g_1 bis g_4 werden anhand der Messwerte bestimmt, wobei die Koeffizienten g_5 bis g_{14} wie gehabt aus Reanalysedaten bestimmt werden.

Die Ergebnisse des Vergleichs sind für die gesamte resultierende Zeitreihe in Abbildung 11 zusammengefasst. Die Korrelation zwischen den Modelldaten unter Berücksichtigung der Station Scharhörn und den Messdaten beträgt 0,90. Dies entspricht in etwa einem Bestimmtheitsmaß von 0,82. Damit werden durch das Windstaumodell für den gewählten Untersuchungszeitraum rund 82 % der beobachteten Variabilität auf Stundenwertbasis erklärt. Gleichzeitig liegt der RMSE zwischen beiden Zeitreihen bei 16,23cm. Der „Index of Agreement“ liegt, bei 0,95 und postuliert damit eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Mess- und Modellwerten. Unter ausschließlicher Verwendung der Reanalysedaten ändern sich diese statistischen Kenngrößen nur marginal mit leicht besseren Ergebnissen für das Modell unter Berücksichtigung der Stationswinddaten. Eine deutlich größere Verbesserung kann durch die Regionalzeitreihe der Feuerschiffe erreicht werden. Unter Berücksichtigung der Feuerschiffdaten erhöhen sich das Bestimmtheitsmaß und der Index of Agreement auf 0,83 bzw. 0,95, während der RMSE um rund 0,5 cm auf 15,68 cm reduziert werden kann.

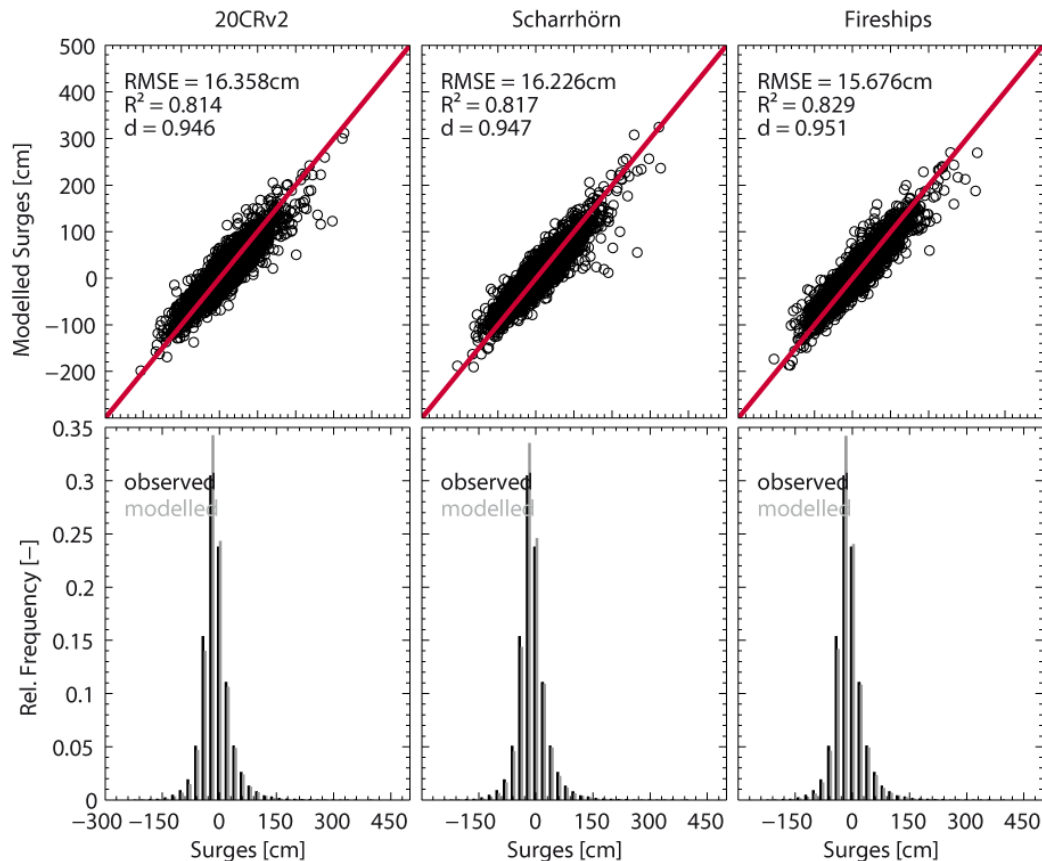


Abbildung 11: Korrelationsplots zwischen modelliertem (y-Achse) und gemessenem Windstau (x-Achse) am Pegel Cuxhaven unter Verwendung von Mess- (links) und Reanalysedaten für die Periode 1976-1999 (oben). Aus grafischen Gründen ist hier nur jeder zehnte Wert dargestellt. Im unteren Teil der Grafik sind die zugehörigen Verteilungsfunktionen des Windstaus zu sehen (schwarz – gemessen; grau – modelliert).

Ein deutlicherer Unterschied zwischen beiden Modellen ergibt sich bei der Betrachtung extremer Ereignisse. Abbildung 12 zeigt die 6 größten Windstauereignisse der Periode 1976-1988. Die Ereignisse wurden unter Verwendung eines Grenzwertes von 1,5 Tagen declustert. Für die Mehrzahl der Ereignisse ist das Windstaumodell unter Berücksichtigung der Messdaten der Station Scharnhörn bzw. der Feuerschiffdaten etwas besser in der Lage die Windstauspitzen zu modellieren. Zwar sind beide Modelle in der Lage den generellen Verlauf des Windstaus mehr oder weniger adäquat wieder zu geben, jedoch verbleiben vor allem für die Windstauspitzen recht deutliche Differenzen zwischen den gemessenen und den modellierten Werten. Für vier von sechs Ereignissen können die Differenzen durch die Verwendung von Messdaten in der Spitze minimiert werden. Bei Ereignissen bei denen dies nicht möglich ist, kann mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass noch verbliebende Inhomogenitäten in den Messdaten für die Differenzen verantwortlich sind. Diese könnten aber vermutlich durch die Integrierung des gesamten Ensembles aus Messdaten in der Deutschen Bucht vermindert werden.

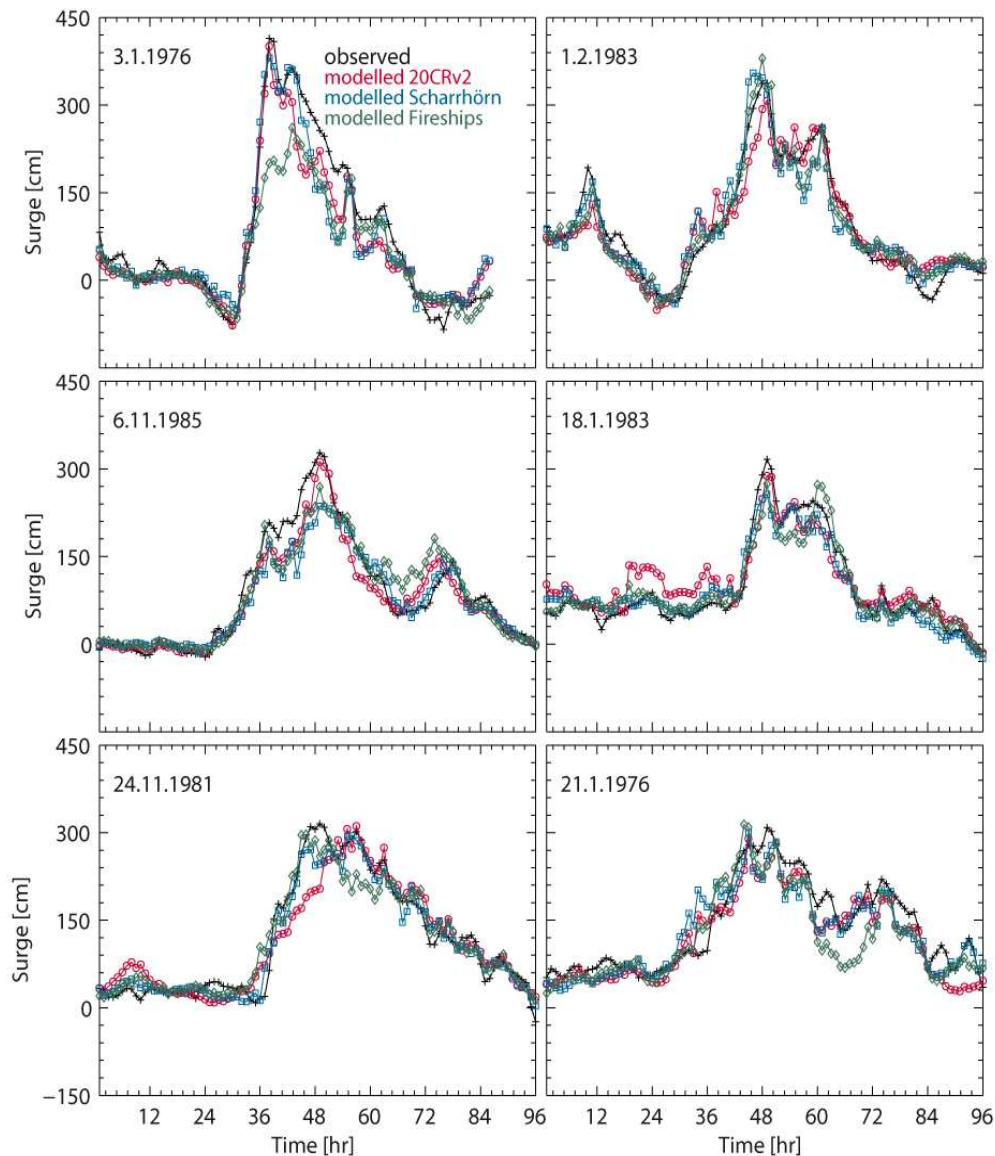


Abbildung 12: Modellierung der 10 größten Windstauereignisse in der Periode 1976-1999 am Pegel Cuxhaven für ein Windstaumodell, welches bei als lokalen Wind Messdaten der Station Scharnhörn berücksichtigt (rot) und ein Windstaumodell, das bei allen Komponenten Reanalysedaten als Input nutzt.

4.4 Modellierung und Validierung 1918-2008

In diesem Kapitel werden nun in der Folge die Reanalysedaten dazu verwendet, um den gesamten Aufzeichnungszeitraum am Pegel Cuxhaven zu rekonstruieren. Da, wie in Kapitel 2.2 bereits erwähnt, die Reanalysedaten vor 1950 mit größeren Unsicherheiten behaftet sind, werden die Regressionskoeffizienten mit Hilfe des Teilzeitfensters von 1950-2008 berechnet. Dies vermindert zum einen die Unsicherheiten bei der Bestimmung der korrekten Koeffizientensätze, zum Anderen kann auf diese Weise für die Jahre vor 1950 die Stabilität der Koeffizientensätze geprüft werden. Des Weiteren wurde parallel für die Periode zwischen 1950 und 1999 eine Kombination aus

Messdaten der Feuerschiffe und der Station Scharhörn in ein weiteres Modell integriert.

Abbildung 13 zeigt für die Jahre von 1990 bis 1994 exemplarisch den Vergleich zwischen gemessenen und rekonstruiertem Windstau. Die Performance des Modelles ist gut und die maßgeblichen Fluktuationen können adäquat wiedergegeben werden. So wird die bekanntermaßen größere Variabilität des Windstaus über die Wintermonate mehr oder weniger vollständig über das statistische Modell erfasst. Dies zeigt sich auch in den statistischen Parametern. Das Bestimmtheitsmaß für die Rekonstruktion der Reanalyse liegt bei 0,81 (Index of Agreement = 0,95), während der RMSE einen Wert von 16,04 cm annimmt.

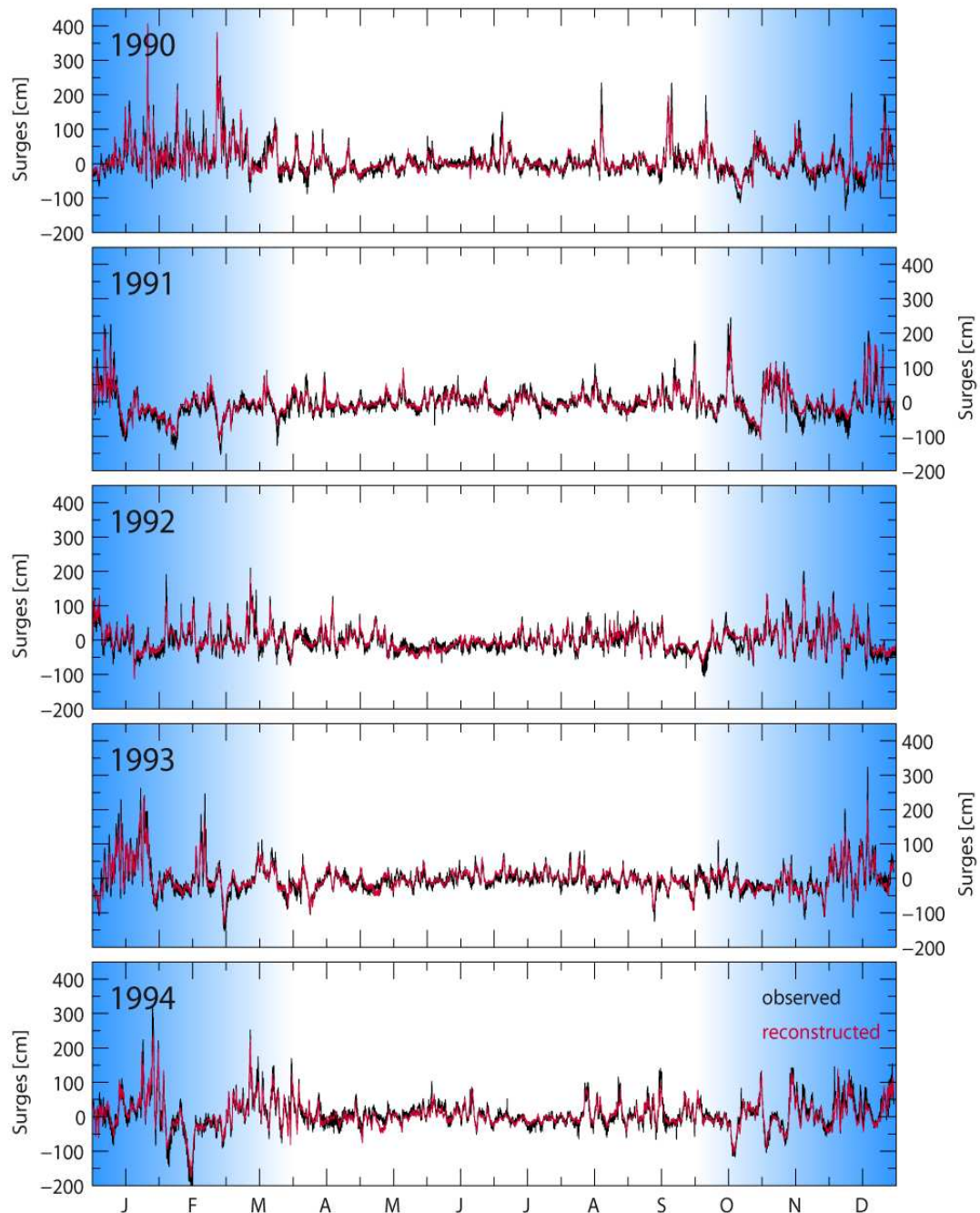


Abbildung 13: Vergleich des stündlich gemessenen (schwarz) und über 20CR rekonstruierten Windstaus für die Jahre 1990 bis 1994 am Pegel Cuxhaven. Die Sturmflutsaisons von Oktober bis März sind durch die blaue Schattierung hervorgehoben.

Diese Werte unterscheiden sich nicht signifikant von den Werten, die sich für den gesamten Aufzeichnungszeitraum von 1918-2008 ergeben. Bei Integration der Messwerte erhöhen sich die statistischen Parameter leicht ($R^2 = 0,82$; $d = 0,95$; $RMSE = 15,75$ cm). Die Performance des Modelles variiert jedoch über die gesamte Wasserstandsverteilung hinweg. Dies verdeutlicht sich in Abbildung 14. Die Abbildung zeigt

den Vergleich der gemessenen und mit Hilfe des Windstaumodelles modellierten Gesamtwasserstände (hier wurde also die astronomische Tide wieder zu den gemessenen und modellierten Windstauwerten hinzu addiert). Während sich für die mittleren Wasserstände vernachlässigbar kleine Differenzen zwischen Mess- und Modellwerten ergeben, steigt der Bias für die extremeren Perzentile an. Dies gilt sowohl für die Niedrig- als auch für die Hochwasserbereiche. Die Korrelationen zwischen den jährlichen Wasserstandsperzentilen zeigen ein ähnliches Bild, wobei hier der Effekt in den Niedrigwasserbereichen deutlicher wird (Abbildung 14b). Auch wenn die Korrelationen noch immer verhältnismäßig hoch sind ($>0,9$), so zeigen sich doch recht deutliche Differenzen zu den mittleren Wasserstandsbereichen.

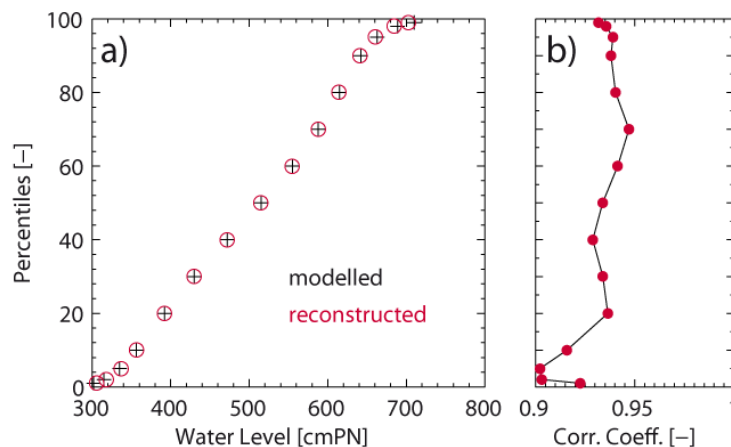


Abbildung 14: a) Perzentile des gemessenen (schwarz) und rekonstruierten (rot) Wasserstandes. b) Korrelation zwischen gemessenen und rekonstruierten jährlichen Perzentilen am Pegel Cuxhaven 1918-2008.

Da für die den Küstenschutz bzw. allgemein das Küstenzonenmanagement vor allem die extrem hohen Windstauereignisse von Interesse sind, wurden die Top10-Ereignisse über den gesamten Aufzeichnungszeitraum auch hier noch einmal getrennt voneinander betrachtet. Wie schon in dem vorherigen Kapitel beschrieben, wurde auch hier ein Grenzwert von 1,5 Tagen zum declustern angesetzt. Die Einzelereignisse sind in Abbildung 15 beispielhaft für den Pegel Cuxhaven dargestellt. Das höchste Ereignis ereignete sich am 23.02.1967 mit einer Höhe von 418 cm. Weder mit Hilfe der Reanalyse- noch mit Hilfe der Messdaten lässt sich dieses Ereignis in seiner vollen Ausprägung rekonstruieren. Zwar ist der grundsätzliche Verlauf recht gut wiedergegeben, jedoch unterschätzt das Modell das absolute Maximum um rund 100 cm (315,8 cm). Das zweithöchste Ereignis vom 03.01.1976 ist dagegen deutlich besser getroffen (vergleiche auch Rekonstruktion der Gesamtwasserstände in Abbildung 16). Mit Hilfe der Renalysedaten kann der Scheitel hier am besten rekonstruiert werden. So fällt die Unterschätzung des Modelles mit nur noch knapp 40 cm deutlich geringer als bei dem 1967er Ereignis aus. Insgesamt zeigt sich, dass bei einigen Ereignissen vor allem durch die Integration der Messdaten zum Teil bessere Ergebnisse erzielt werden können. Dies gilt in diesem Fall für die Ereignisse 7 und 8, welche beide mit

Hilfe der Feuerschiffdaten fast vollständig rekonstruiert werden können. Wie bereits im vorherigen Kapitel angedeutet, lässt eine Integration weiterer Messstationen für die Rekonstruktion einer regional gültigen Windzeitreihe weitere Verbesserungen erhoffen.

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

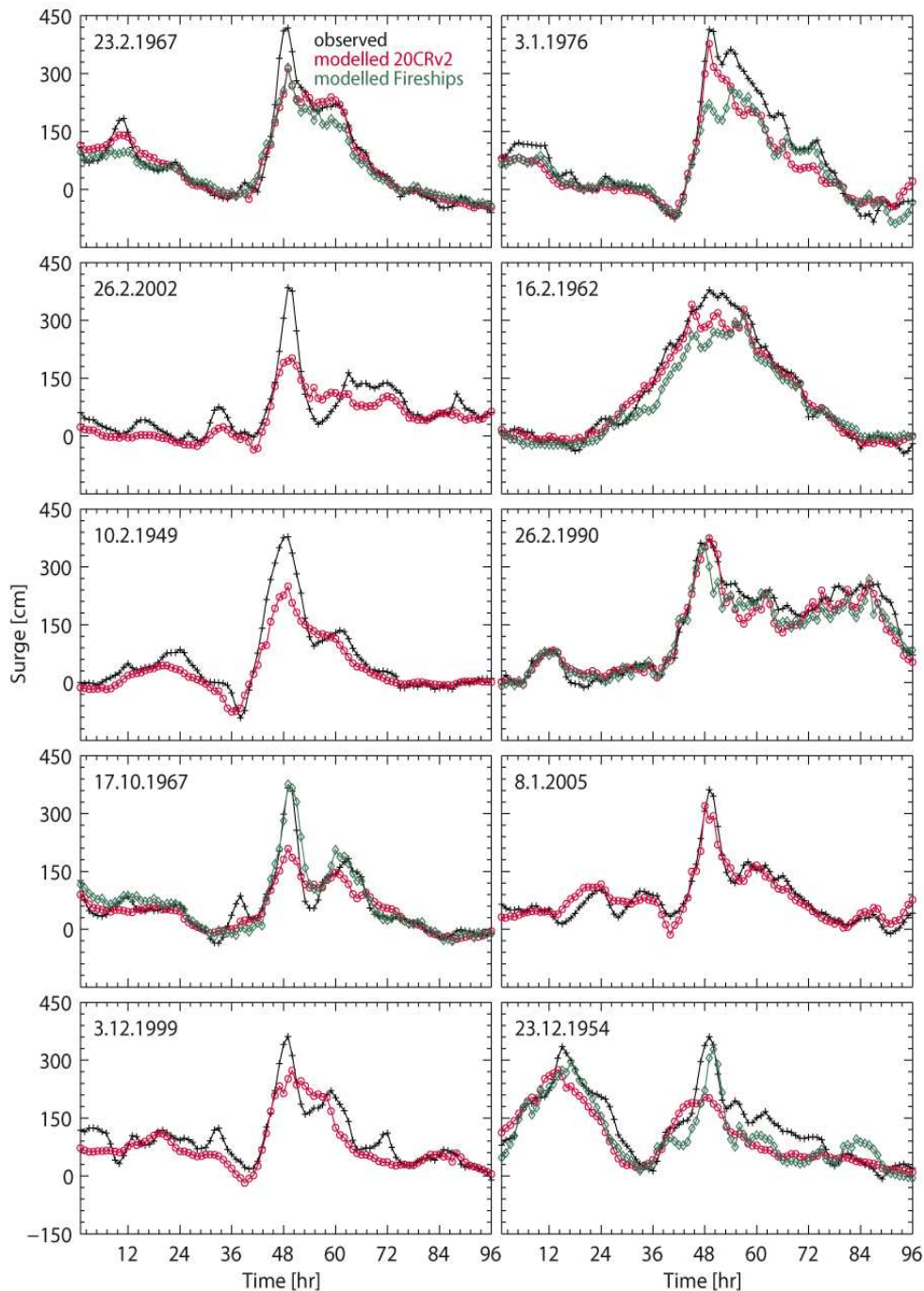


Abbildung 15: Vergleich der 10 größten Windstauereignisse über den gesamten Aufzeichnungszeitraum am Pegel Cuxhaven.

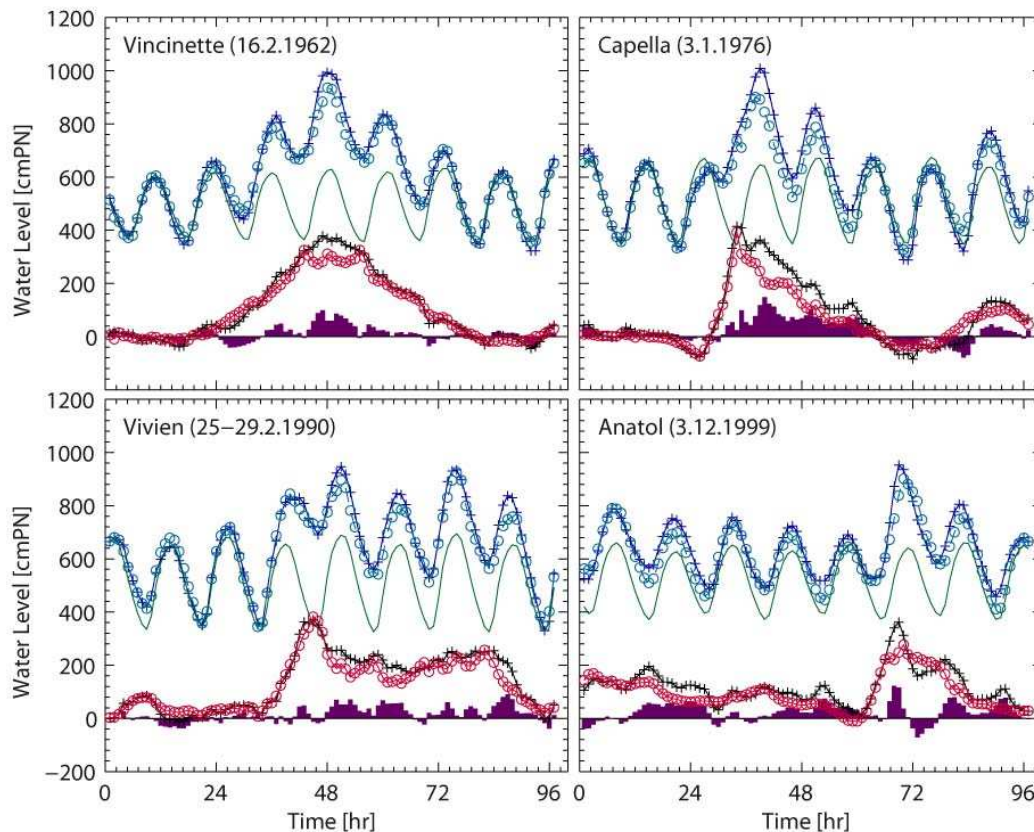


Abbildung 16: Vergleich Messung versus Rekonstruktion für vier Sturmflutereignisse. Aufgetragen sind der gemessene Gesamtwasserstand (blaue Linie mit Kreuzen), der rekonstruierte Gesamtwasserstand (blaue Linie mit Kreisen), der gemessene Windstau (schwarze Linie mit Kreuzen), der rekonstruierte Windstau (rote Linie mit Kreisen), sowie die Differenzen zwischen Messung und Rekonstruktion (lila Balken).

Um zu überprüfen, in wie fern die Performance des statistischen Windstaumodell von der zeitlichen Periode abhängig ist, wurde die Rekonstruktion Jahr für Jahr über den gesamten Aufzeichnungszeitraum mit den gemessenen Windstauwerten verglichen. Abbildung 17 zeigt die aus den Untersuchungen resultierende zeitliche Entwicklung der Gütekriterien von 1918-2008. Alle drei Gütemaße sind durch interannuelle Schwankungen geprägt, zeigen aber keine signifikante Langzeitveränderung. Dies gilt auch für den kritischen Zeitraum vor 1950. Zum einen verdeutlicht diese Untersuchung die Stationarität der statistischen Beziehungen zwischen dem Windstau und den einzelnen Parametern des Windstaumodell. Zum anderen lassen die Ergebnisse darauf schließen, dass für die relevante Periode die Variabilität durch die Reanalyse adäquat wiedergegeben wird. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Dangendorf et al. (2013c). Ein differenzierteres Bild zeigt sich bei der Betrachtung der langzeitlichen Veränderungen der rekonstruierten Gesamtwasserstände in Abbildung 18. In dieser Abbildung werden die 10-jährigen gleitenden Mittel repräsentativer Perzentile des Gesamtwasserstandes mit den entsprechenden resultierenden Zeitreihen aus dem Windstaumodell (plus Astronomie) verglichen. Für die moderateren Perzen-

tilen (≥ 10 & ≤ 90) ist das Windstaumodell unter Verwendung der Reanalysedaten in der Lage, die beobachtete Entwicklung fast vollständig und adäquat wiederzugeben. Dies gilt sowohl für die Variabilität, als auch für die resultierenden Linear-trends (vergleiche auch Abbildung 19).

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

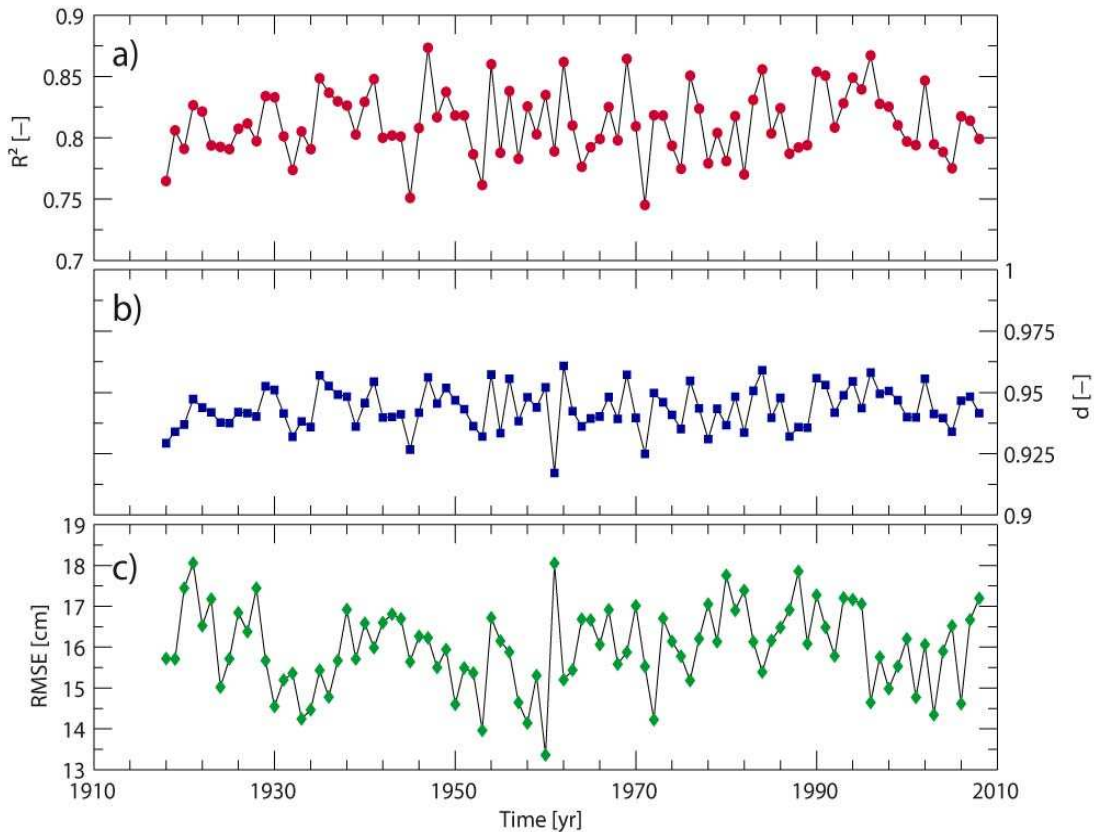


Abbildung 17: Zeitliche Entwicklung der Gütekriterien zwischen modelliertem und rekonstruiertem Windstau auf Basis der 20CR Inputdaten für Cuxhaven 1918-2008. a) Bestimmtheitsmaß, b) Index of Agreement und c) RMSE.

Für die extremeren Perzentile hingegen ergibt sich mit ansteigenden/fallenden Perzentilen zum einen ein größerer Bias in Form eines Vertikaloffsets, der aus einer generellen Unterschätzung extremer Ereignisse resultiert, zum anderen deuten sich für die extrem hohen Perzentile (>95 . Perzentil) erste Unterschiede in der Trendentwicklung an. Dies wiederum bestätigt die Untersuchungen von Krüger et al. (2012), die vor allem in den ersten Dekaden (vor 1900) eine stark divergente Entwicklung in den geostrophischen Winden der 20CRv2 Reanalyse gefunden haben. Zwar kann unter Verwendung der hier gewählten Zeitspanne nicht von statistisch signifikant unterschiedlichen Trends gesprochen werden (Abbildung 19), jedoch lassen sich erste Hinweise hierfür detektieren.

Der oben angesprochene Vertikaloffset kann für den verfügbaren Zeitraum unter Berücksichtigung der Messdaten vor allem für die höheren Perzentile fast vollständig reduziert werden. Jedoch zeigt die Rekonstruktion einen kurzfristigen starken Anstieg

in den oberen Perzentilen gegen Ende der 1980er Jahre, der in den Mess- und Reanalysedaten so nicht wiedergefunden werden kann. Damit kann vermutet werden, dass es sich auch hier um ein Artefakt der inhomogenen Windmessungen handelt.

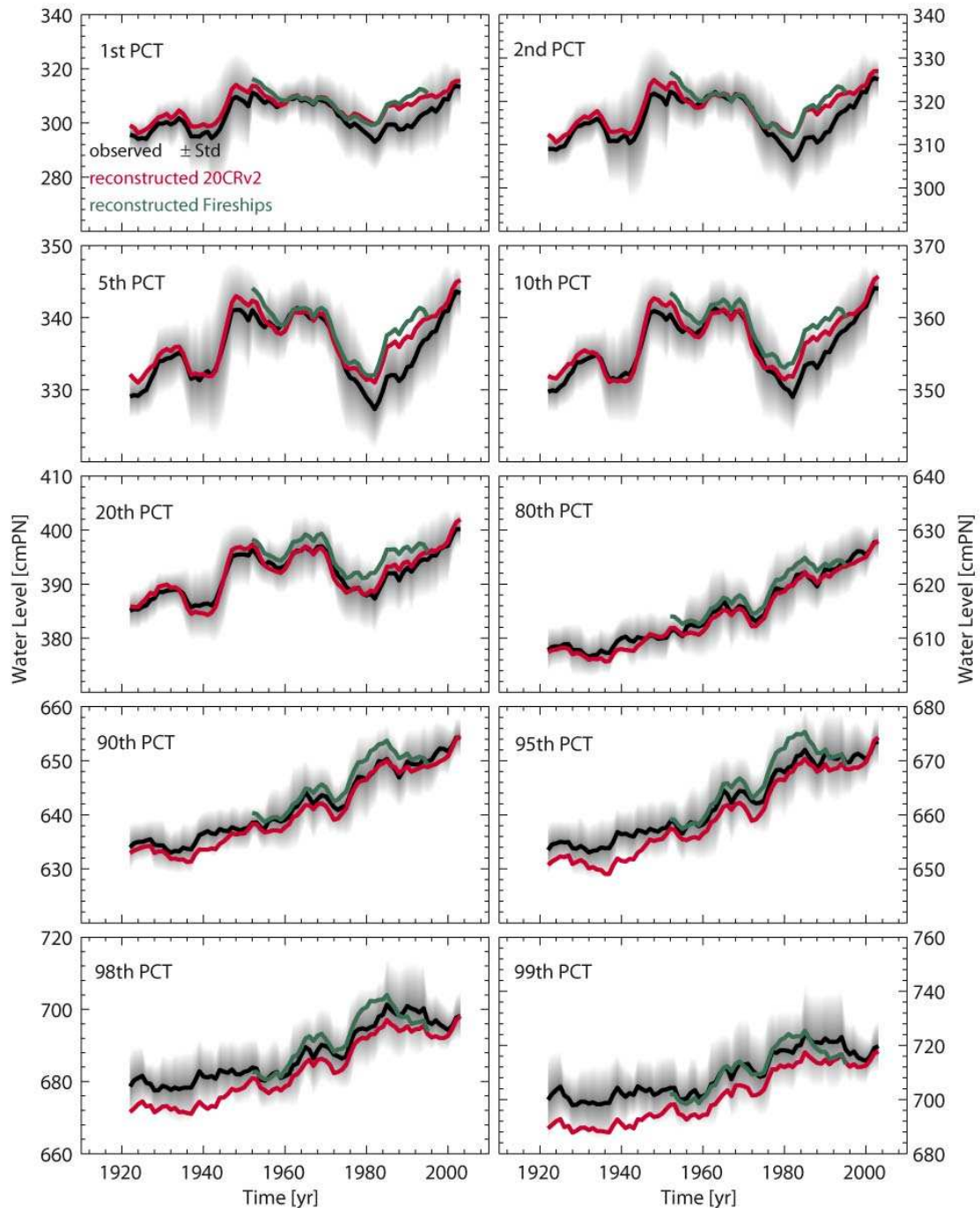


Abbildung 18: 10 jähriges gleitendes Mittel ausgewählter Perzentile aus gemessenen und aus 20CR rekonstruierten Gesamtwasserständen (astronomische Tide plus rekonstruierter Windstau). Der schattierte Bereich um die Messwerte gibt die Standardabweichung der gleitenden Mittel wieder. Für den verfügbaren Zeitraum sind außerdem die rekonstruierten Wasserstände aus Feuerschiffmessungen integriert (grün).

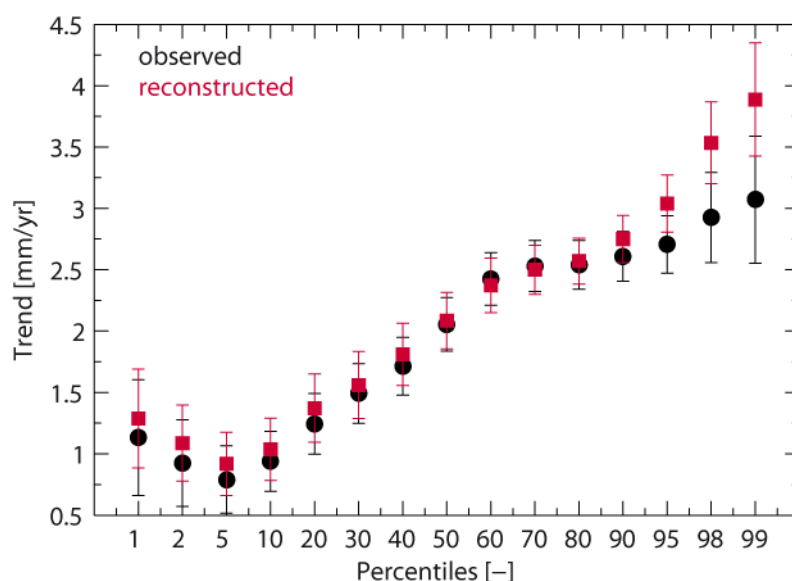


Abbildung 19: Lineartrends der Perzentile des Gesamtwasserstands für Mess- und Modellwerte am Pegel Cuxhaven für den Zeitraum 1918-2008. Die Unsicherheitsbänder kennzeichnen den 1σ -Standardfehler.

4.5 Anwendung des Modelles auf zwei weitere Pegelstandorte

Das Modell wurde maßgeblich am Pegel Cuxhaven kalibriert und getestet, da für diesen Pegel zum einen eine lange hochauflösende Messreihe der Wasserstände, sowie die zugehörige Astronomie des BSH vorlag. An weiteren Pegeln im Gebiet der Deutschen Bucht sind langjährige Messreihen in Form von Stundewerten leider nicht verfügbar. Daher liegen auch vom BSH zur Zeit keine hochauflösenden Astronomien für diese Pegel vor (Zeitreihenlängen ≥ 19 Jahre müssen verfügbar sein \rightarrow Modulationen langperiodischer Schwingungen). Um dennoch einen Überblick über die Performance des Modelles an weiteren Pegelstandorten zu testen wurden daher die beiden Pegel Norderney und Hallig Hooge ausgewählt, für die dann über einen gemeinsamen Aufzeichnungszeitraum von 2000-2008 mit Hilfe des T-Tide-Programmes Astronomien zu berechnet wurden. Anschließend wurde an beiden Pegeln durch Bildung der Differenzen zwischen gemessenem Wasserstand und astronomischer Vorausberechnung eine Windstauzeitreihe rekonstruiert.

In einem zweiten Schritt wurden dann die Windstauzeitreihen mit dem selben Modell wie für Cuxhaven unter Verwendung der 20CR Reanalysedaten, sowie lokaler Windmessungen (Norderney: Borkum Süderstraße, Hallig Hooge: Hallig Hooge) rekonstruiert. Es wurde für beide Pegel weiterhin getestet, in wie fern sich die verzögerten Korrelationen zwischen den Inputparametern des Windstaumodelles und dem tatsächlich gemessenen Windstau verändern, jedoch konnten hier keine signifikanten Unterschiede zum Pegel Cuxhaven gefunden werden. Daher wurde mit denselben Parameterkombinationen wie am Pegel Cuxhaven gerechnet, wobei für die Berück-

sichtigung der lokalen Windmessungen jeweils zwei abweichende Messreihen verwendet wurden (Borkum Süderstraße und Hallig Hooge).

Die Ergebnisse der Modellierung finden sich in Tabelle 3 und Abbildung 20 (Norderney) und Abbildung 21 (Hallig Hooge) für die ganzheitliche Betrachtung der gesamten Windstau-Rekonstruktion, sowie für die Betrachtung der Top10 Windstauereignisse in Abbildung 22 (Norderney) und Abbildung 23 (Hallig Hooge). Bezogen auf den gesamten Aufzeichnungszeitraum fällt zunächst einmal auf, dass die Gütekriterien allesamt deutlich niedriger ausfallen als für den Pegel Cuxhaven. So schwankt das Bestimmtheitsmaß an beiden Pegeln je nach Verwendung von Mess- oder Reanalysedaten zwischen 0,70 und 0,71, während der RMSE Werte zwischen 16,45 cm (Norderney 20CR) und 18,59 cm (Hallig Hooge Messdaten) annimmt. Damit liegt die erklärte Variabilität an beiden Pegeln rund 13% unter dem Wert der am Pegel Cuxhaven liegt. Dies führt zu einem höheren RMSE in der Ordnung von bis zu ~3 cm. Eine Begründung dieser recht erheblichen Abweichungen kann hier vermutlich in der etwas ungenaueren Astronomie gefunden werden. Eine genauere Inspektion der resultierenden Windstauzeitreihe ergab, dass zum Teil noch kleinere periodische Anteile im Windstau enthalten sind, welche von der Astronomie nicht erfasst wurden. Während die Schwingungen für Analysen des Langzeitverhaltens eine untergeordnete Rolle spielen, wirken diese sich deutlich stärker auf die Korrelationsbeziehung zwischen hochauflösenden Wind- und Windstaumessungen aus. Der Grund für die verbleibenden periodischen Anteile liegt vermutlich in durch das Programm T-Tide unberücksichtigten Flachwassertiden, welche eine wichtige Rolle in den flachen Gewässern der Deutschen Bucht spielen.

Die Auswirkungen dieser Unsicherheiten bei der Ermittlung der Astronomie fallen jedoch deutlich geringer für die Betrachtung der Top10 Windstauereignisse aus (Abbildung 21 und Abbildung 23). Hier werden die Windstauspitzen sowohl unter Verwendung der Reanalysedaten als auch unter Berücksichtigung lokaler Windmessungen sehr gut getroffen. Für einige einzelne Ereignisse zeigt sich zudem, dass leichte Unterschätzungen der Windspitzen durch die Berücksichtigung von Messwerten zum Teil ausgeglichen werden können. In der Summe lässt sich daher festhalten, dass das Modell erwartungsgemäß durch die hochwertigeren Eingangsdaten am Pegel Cuxhaven insgesamt eine bessere Performance liefert, grundsätzlich aber auch auf weitere Pegel übertragbar sind. Es sollte daher in der Zukunft, sobald verfügbar, für andere Pegel unter Verwendung langjähriger (größer gleich 19 Jahre) Messreihen nachgeprüft werden, ob unter Verwendung der BSH-Astronomien bessere Ergebnisse erzielt werden können.

Tabelle 3: Gütekriterien zwischen Modellierung und Messwerten des Windstaus an den beiden Pegelstandorten Norderney und Hallig Hooge für den gemeinsamen Zeitraum 2000-2008. Die Gütekriterien sind sowohl für die Modellierung rein auf Basis der Reanalyse 20CR als auch unter Berücksichtigung von Messdaten für die lokale Windkomponente dargestellt.

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

Pegel	Gütekriterien		
	Bestimmtheitsmaß [-]	Index of Agreement [-]	RMSE [cm]
Norderney 20CR	0,71	0,91	16,45
Norderney Messung	0,70	0,91	16,51
Hooge 20CR	0,71	0,91	18,08
Hooge Messung	0,70	0,91	18,59

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

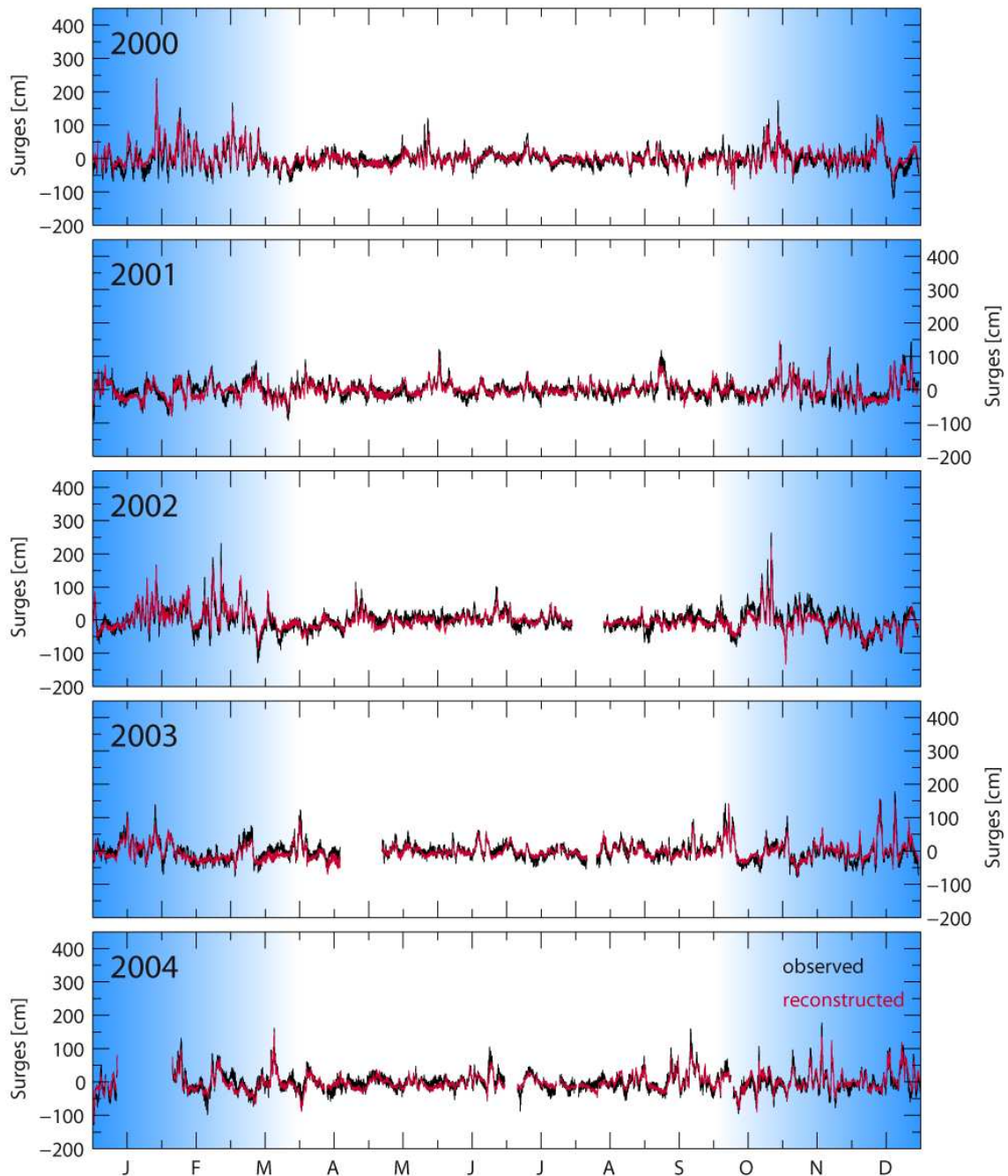
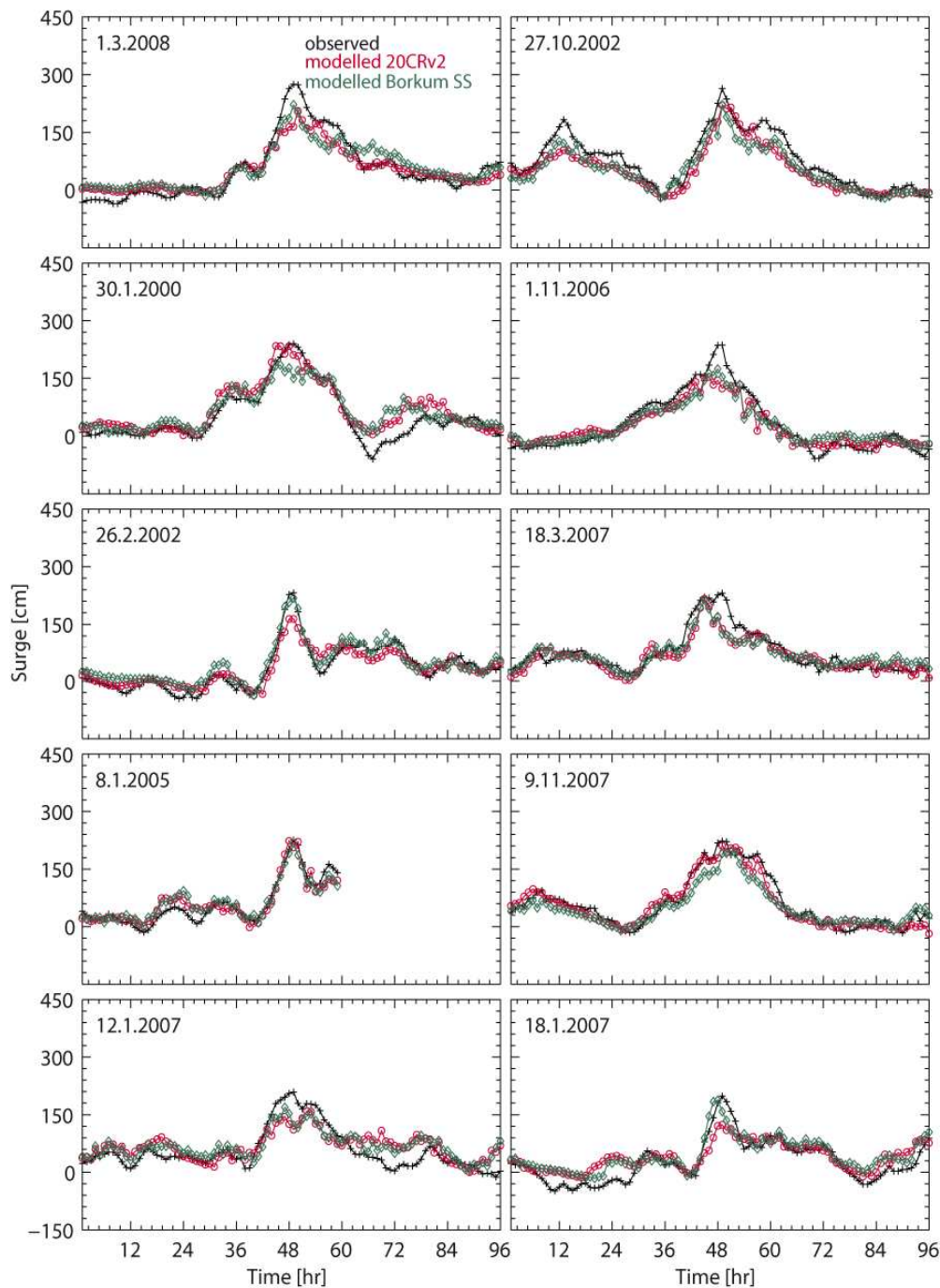


Abbildung 20: Vergleich des stündlich gemessenen (schwarz) und über 20CR rekonstruierten Windstaus für die Jahre 2000 bis 2004 am Pegel Norderney. Die Sturmflutsaisons von Oktober bis März sind durch die blaue Schattierung hervorgehoben.



KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

Abbildung 21: Vergleich der 10 größten Windstauereignisse über den Aufzeichnungszeitraum 2000-2008 am Pegel Norderney.

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

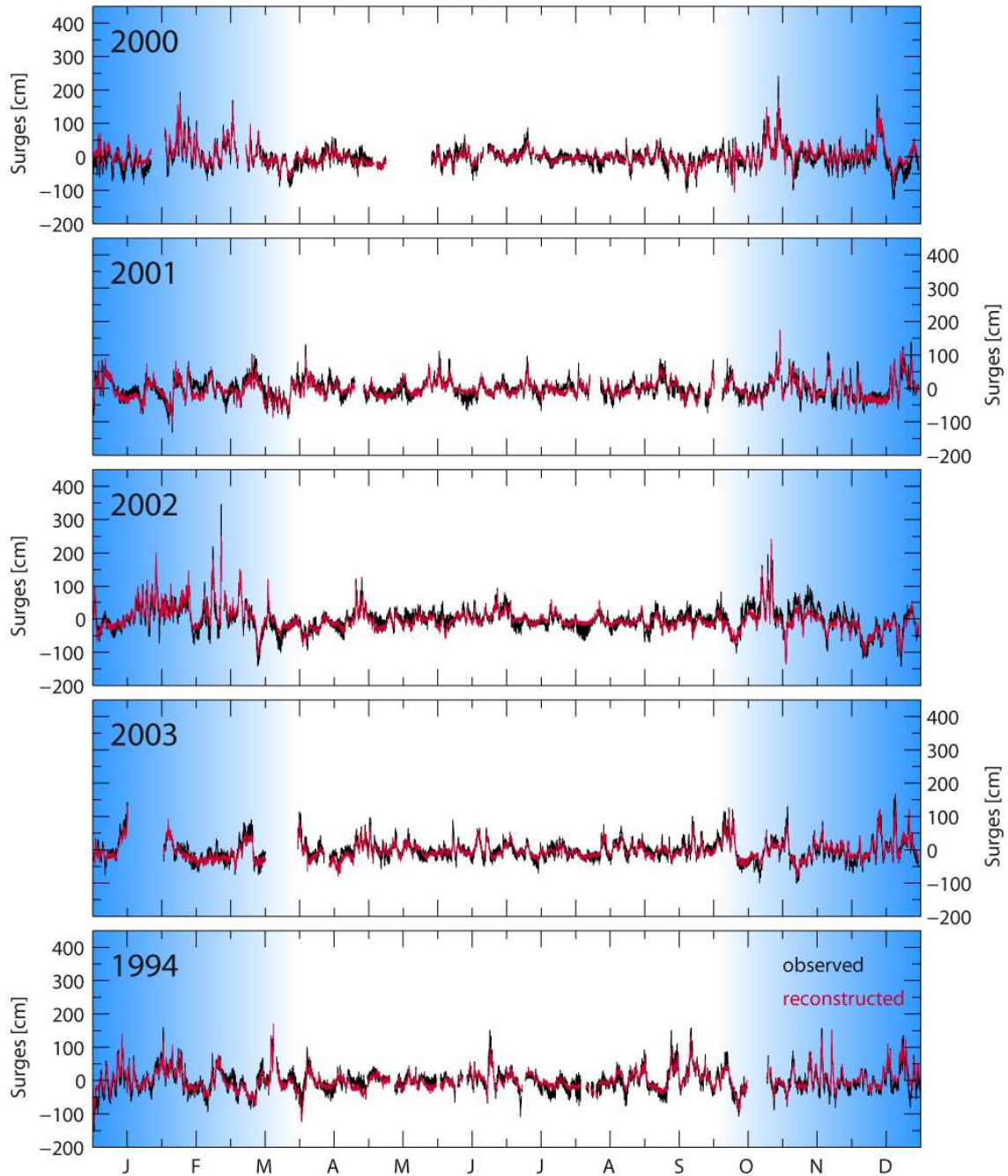
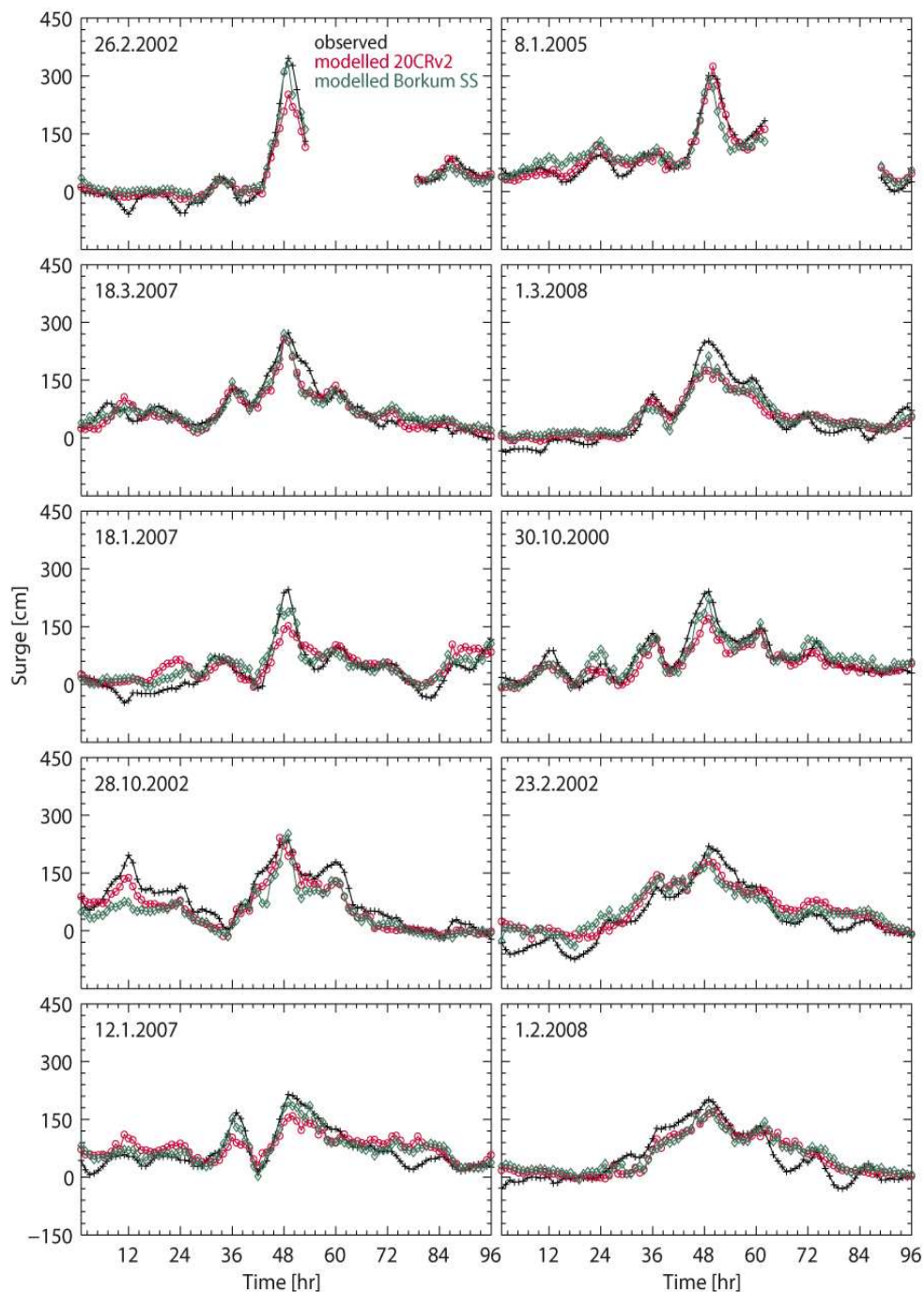


Abbildung 22: Vergleich des stündlich gemessenen (schwarz) und über 20CR rekonstruierten Windstaus für die Jahre 2000 bis 2004 am Pegel Hallig Hooe. Die Sturmflutsaisons von Oktober bis März sind durch die blaue Schattierung hervorgehoben.



KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

Abbildung 23: Vergleich der 10 größten Windstauereignisse über den Aufzeichnungszeitraum 2000-2008 am Pegel Hallig Hooge.

5 Diskussion und Fazit

In dem vorliegenden Bericht wurden umfangreiche Analysen zum Windstau in der Deutschen Bucht durchgeführt. Die Basis für die Analysen lieferte eine Zeitreihe des stündlichen Windstaus, welche am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) durch Herrn Dr. Müller-Navarra ermittelt wurde. Die verwendete Berechnungsmethode findet für die Vorhersage der Tidehoch- und -niedrigwasser täglich im operationellen Betrieb des BSH Anwendung und wurde für die Zwecke der vorliegenden Untersuchungen erstmalig auch auf Stundenwerte des Pegels Cuxhaven übertragen. Im Gegensatz zu am Markt frei verfügbaren Analysetools wie T-Tide (Pawlowicz et al. 2002), U-Tide (Codiga et al. 2011) oder Task2000 (Bell et al. 1999), ist das Verfahren des BSH im Speziellen für die komplexen Rahmenbedingungen in der Deutschen Bucht (Flachwassereffekte, nichtlineare Interaktionen) ausgelegt. Daher wurde zunächst in einem ersten Schritt geprüft, inwiefern sich die berechneten Astronomien aus frei verfügbaren Softwareprogrammen von den BSH-Vorhersagen unterscheiden. Die Differenzen zwischen den beiden Astronomien sind moderat und schwanken in Abhängigkeit der Tidephase zwischen -0,8 und 0,6% (bezogen auf die Häufigkeitsverteilungen der Astronomie). Die größten Abweichungen finden sich maßgeblich in den Bereichen des mittleren Tideniedrigwasser, was den Rückschluss nahelegt, dass hier vor allem unberücksichtigte Flachwassertiden und nichtlineare Interaktionen in T-/U-Tide für Differenzen in den Astronomien sorgen. Ein Nachteil der Berechnungsverfahren des BSH besteht in der Abhängigkeit des Verfahrens für Zeitskalen, die mindestens einen Nodalzyklus umfassen. Aus diesem Grund können die Analysen gegenwärtig nur für Pegel mit Datenlängen größer gleich 19 Jahre erfolgen. Solch lange zeitlich hochaufgelöste ($<1\text{h}$) Wasserstandszeitreihen liegen jedoch zur Zeit nur unzureichend in der Deutschen Bucht vor. Der Großteil verfügbarer Tidepegel umfasst Datenlängen kleiner 19 Jahre. Für diese Pegel bietet sich daher an, Partialtidenanalysen mit den Programmen T-/U-Tide durchzuführen, da diese Programme Analysen auch für Datenreihen kleiner gleich einem Jahr ermöglichen. Hier werden zur Berücksichtigung der Modulationen langperiodischer Schwingungen sogenannte Sattelitenkorrekturen durchgeführt (Pawlowicz et al. 2002).

Auf der Basis der langjährigen Beobachtungsreihe des Pegels Cuxhaven wurden für die Periode 1918-2008 zunächst Analysen zur langzeitlichen Veränderung des Windstaus vorgenommen. Hierfür wurden unterschiedliche Sturmindizes berechnet, die möglichst breit gefächerte Informationen über Veränderungen der Sturmhäufigkeiten in der Deutschen Bucht geben sollten. Neben einer einfachen mehrdekadischen Auszählung der TOP100 Windstauereignisse oder der Berechnung der oberen Perzentile (95., 98., 99. und 99,9. Perzentil) des stündlichen Windstaus, wurden des Weiteren die drei Indizes Count (Anzahl der Überschreitungen eines vordefinierten Grenzwert-

tes, hier 95. und 99. Perzentil), Duration (Verweilzeit über selbigem Grenzwert) und Intensity (Intensität als Integral der Fläche eines Windstauereignisses über selbigem Grenzwert) berechnet (vergleiche auch Zhang et al. 1998). Keiner der berechneten Sturmindices weist auf einen signifikanten Langzeittrend hin. Dies bestätigt frühere Ergebnisse aus den Analysen der geostrophischen Winde im Gebiet der Deutschen Bucht (Schmidt und von Storch 1993, Weisse und von Storch 2009, Rosenhagen und Schatzmann 2011). Jedoch deuten alle Indizes auf eine ausgeprägte multidekadische Variabilität hin, mit einer Phase verminderter Sturmhäufigkeit in den 1930er und 1940er Jahren und einer Phase erhöhter Intensität zwischen 1960 und ca. 1995. In dem letzten Jahrzehnt dagegen zeigen die Beobachtungen wieder eine eher rückläufige Entwicklung.

Des Weiteren wurden vergleichende Betrachtungen zwischen dem Windstau und Windaufzeichnungen synoptische Windstationen sowie Feuerschiffen durchgeführt. Die Schwierigkeit hierbei lag vor allem in der Findung einer homogenen regionalen Windzeitreihe für die Deutsche Bucht, da für den Beobachtungszeitraum Windmessungen bekanntermaßen erheblichen Unsicherheiten und Inhomogenitäten unterliegen (Lindenberger et al. 2012) und die Messungen durch unterschiedliche Feuerschiffe und über variierende Zeiträume vorgenommen wurden. Um diese Unsicherheiten zu minimieren, wurde ein pragmatischer Ansatz gewählt, welcher die verfügbaren Messwerte täglich mit den verfügbaren Windstauwerten vergleicht und immer die Messung berücksichtigt, die an dem jeweiligen Tag die höchste Korrelation zum Windstau in Cuxhaven aufweist. Bei diesem Verfahren kann, falls verfügbar, aus unterschiedlichen Messungen ein möglichst homogener Messdatensatz für die Deutsche Bucht gewonnen werden (unter der Annahme, dass der Pegel Cuxhaven als repräsentativ für die Deutsche Bucht angesehen werden kann). In den vorliegenden Untersuchungen wurden allerdings nur Messreihen der Feuerschiffe berücksichtigt. Dies bedeutet zum Einen, dass häufig nur einzelne Windmessungen verfügbar waren und die Qualität somit von einer einzelnen Messung abhängt, zum Anderen ist die resultierende Zeitreihe nur bis ca. 1988 verfügbar. Eine Integration aller verfügbaren Stationsdaten könnte auf diese Weise jedoch zukünftig ermöglichen eine langjährige quasi-homogene Messreihe des 10m Windes für die Deutsche Bucht zu rekonstruieren. Dies liegt allerdings außerhalb der abzuarbeitenden Aufgabenstellung des vorliegenden Berichtes und wurde demnach nicht weiter verfolgt. Nichtsdestotrotz sollten die Messdaten vor allem für die Untersuchungen der Wechselwirkung zwischen Wind und Windstau Berücksichtigung finden. Daher wurden an den verfügbaren Zeitraum der Feuerschiffdaten bis 1988 weiterhin Messdaten der Station Scharhörn angehängt, welche bis 1999 qualitativ hochwertig und ohne große Lücken vorliegen.

Um den Windstau in der Deutschen Bucht adäquat berechnen zu können wurde auf das Windstaumodell von Müller-Navarra und Giese (1999) zurückgegriffen, welches auch heute noch Anwendung im operationellen Sturmflutwarndienst Anwendung findet. Aus diesem Modell wurden zum Einen die Terme des lokalen Windes, aber auch der Term zur Berücksichtigung lokaler Luftdruckschwankungen entnommen.

Für die Berücksichtigung von Fernwellen wurde weiterhin der Wind und Luftdruck von einem Reanalysegridpunkt am nördlichen Rand der Nordsee integriert. Um potentielle Wechselwirkungen zwischen der vorherrschenden Wassersäule und dem einwirkenden Wind zu berücksichtigen (Tide-Surge-Interaction, Horsburgh und Wilson 2007), wurden zudem Koeffizientensätze für einzelne Tidephasen berechnet. Hierdurch konnte die Performance des Modelles maximiert werden. Das Modell kann unter Berücksichtigung aller Faktoren über 80 % der stündlich beobachteten Wasserstandsvariabilität erklären ($RMSE < 16$ cm); ein Wert der der Performance verfügbarer hydrodynamischer Modellierungen (Weisse und Pluess 2006) erstaunlich nahe kommt. Schwächen zeigt das Modell vor allem in der Modellierung der absoluten Windstaumaxima. Hier kommt es vor allem für die extrem hohen Ereignisse zu einem Bias. Dieser Bias kann sich in unterschiedlichen Unsicherheiten begründen:

1. In den vorliegenden Untersuchungen wurde ein Ensemble-Mean der Reanalyse verwendet. Dieser mittelt insgesamt 37 unabhängige Realisationen der Reanalyse. In unterschiedlichen Realisationen der Reanalyse können durch unterschiedliche Faktoren verursacht einzelne Extrema nicht vollständig erfasst sein. Durch die Mittelung aller Ereignisse kann es daher vereinzelt zu einer tendenziellen Unterschätzung eines Extremereignisses kommen, die sich dann in das Windstaumodell fortpflanzt.
2. Die zeitliche Auflösung der Reanalyse beträgt 3 Stunden, während die Wasserstände stündlich gemessen wurden. Daher wurde die Reanalyse zunächst auf Stundenwerte interpoliert. Durch die gröbere Auflösung können einzelne Ereignisse in den Inputparametern Wind und Luftdruck nicht immer erfasst sein und somit auch nicht vollständig modelliert werden.
3. Eine weitere Beeinflussung der Ergebnisse ergibt sich aus der groben räumlichen Auflösung der Reanalyse. Die Reanalyse liefert Daten auf einem räumlichen Grid der Auflösung $2^{\circ} \times 2^{\circ}$. Der nächste Gridpunkt zu den Pegeln in der Deutschen Bucht befindet sich bei ungefähr $54^{\circ}N$ und $8^{\circ}E$ und damit einige Kilometer von den verwendeten Pegeln entfernt.

Um die obigen Unsicherheiten näher zu beleuchten wurden daher verfügbare Messwerte des lokalen Windes (die Haupteinflussgröße auf den Windstau) in die Modellierung integriert. Die Performance verbessert sich bei der ganzheitlichen Betrachtung nur minimal. Bei der Betrachtung einzelner Ereignisse fällt jedoch auf, dass die Integration homogener Messdaten (wenn verfügbar) zum Teil die Unsicherheiten mindern kann und einzelne Windstauspitzen etwas besser modelliert werden. Die Tatsache, dass dies nicht konstant bei allen betrachteten Ereignissen der Fall ist, kann mit großer Wahrscheinlichkeit mit Ungenauigkeiten in den Messdaten in Verbindung ge-

bracht werden. Trotzdem ist die Performance des Modelles auch bei den Extremwerten als hinreichend gut zu beurteilen.

Am Pegel Cuxhaven konnte des Weiteren gezeigt werden, dass die bekannten Unsicherheiten der 20CR Reanalyse (Krüger et al. 2012) differenziert zu betrachten sind. Vergleichende Analysen mit dem Windstau deuten daraufhin, dass die Reanalyse bezogen auf die Variabilität qualitativ konstant hochwertige Datensätze zurück bis 1918 liefern kann. Unsicherheiten zeigen sich allerdings in den Langzeittrends der oberen Perzentile der Reanalyse. Hier neigt die Reanalyse in den früheren Dekaden zu einem positiven Langzeittrend, der durch die Messdaten in diese Form nicht vollständig wiedergegeben wird. Dies bestätigen auch erste Untersuchungen zu den Daten über den gesamten Reanalysezeitraum zurück bis 1871, wonach die durch Krüger et al. (2012) aufgedeckten Unsicherheiten sich vor allem auf den Zeitraum vor 1910 niederschlagen (Dangendorf et al. in prep).

Siegen, 29.04.2013

Univ-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen

Dr.-Ing. Christoph Mudersbach

Dipl.-Ing. Sönke Dangendorf

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

6 Literatur

- [1] D.S. Abeysirigunawardena, J.J. Walker. Sea-level responses to climatic variability and change in Northern British Columbia. *Atmosphere-Ocean*, 46:277-296, 2008
- [2] R. Annutsch. Wasserstandsvorhersage und Sturmflutwarnung. *Seewart*, 38, H. 5, 185-204, 1977
- [3] R. Annutsch. Über das empirisch-statistische Sturmflutvorhersageverfahren des Deutschen Hydrographischen Instituts. *Promet*, 8, H. 4, 9-12, 1978
- [4] C. Bell, J.M. Vassie, P.L. Woodworth. POL/PSMSL Tidal Analysis Software Kit 2000 (TASK-2000). 1996. online verfügbar unter:
http://www.psmsl.org/train_and_info/software/analysis.php
- [5] P.D. BROMIRSKI, R.E. FLICK, D.R. CAYAN. Storminess variability along the California Coast: 1858–2000. *J Clim*, 16(6):982–993, 2003
- [6] G.P. COMPO, J.S. WHITAKER, P.D. SARDESHMUKH, N. MATSUI, R.J. ALLAN, X. YIN, B.E. GLEASON, R.S. VOSE, G. RUTLEDGE, P. BESSEMOULIN, S. BRÖNNIMANN, M. BRUNET, R.I. CROUTHAMEL, A.N. GRANT, P.Y. GROISMAN, P.D. JONES, M.C. KRUK, A.C. KRUGER, G. J. MARSHALL, M. MAUGERI, H.Y. MOK, Ø. NORDLI, T.F. ROSS, R.M. TRIGO, X.L. WANG, S.D. WOODRUFF, S.J. WORLEY. The twentieth century reanalysis project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137: 1–28, 2011
- [7] D.L. Codiga. Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions. Technical Report 2011-01. Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Narragansett, RI. 59pp. 2011
- [8] S. Dangendorf, C. Mudersbach, J. Jensen, A. Ganske, H. Heinrich. Seasonal to decadal forcing of high sea level percentiles in the German Bight throughout the last century. *Ocean Dynamics*, 63, 553-548. 2013c
- [9] S. Dangendorf, C. Mudersbach, T. Wahl, J. Jensen. Characteristics of intra-, interannual and decadal sea level variability and the role of meteorological forcing: The long record of Cuxhaven. *Ocean Dynamics*, 63, 209-224. 2013a
- [10] S. Dangendorf, C. Mudersbach, T. Wahl, J. Jensen. The seasonal mean sea level cycle in the southeastern North Sea. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, pp. 1915-1920. 2013b
- [11] S. Dangendorf, S. Müller-Navarra, J. Jensen, F. Schenk, R. Weisse, T. Wahl. North Sea storminess from a novel storm surge record since AD 1843. *Journal of Climate*. (in press)

- [12] M.G.G. Foreman. Manual for tidal heights analysis and prediction. Pacific Marine Science Report, 77-10. 1977
- [13] M.G.G. Foreman. Manual for tidal heights analysis and prediction. Pacific Marine Science Report, 78-6. 1978
- [14] M.G.G. FOREMAN, J. Y. CHERNIAWSKY, V. A. BALLANTYNE. Versatile Harmonic Tidal Analysis: Improvements and Applications. J. Atmos. Oceanic Technol., 26, 806–817. 2009
- [15] G. Godin. The Analysis of Tides. University of Toronto Press, Toronto, pp. 264. 1972
- [16] G. Godin. The use of the admittance function for the reduction and interpretation of tidal records. Manuscript Report Serie4s1 . Ottawa: Marine Sciences Directorate, Environment Canada., 46, p. 1976
- [17] G. Gönnert, B. Gerkenmeier, J.M. Müller, K. Sossidi, S. Thumm. Zur hydrodynamischen Interaktion zwischen den Sturmflutkomponenten Windstau, Tide und Fernwelle. Zwischenbericht TP1a XtremRisk. 2010. online verfügbar unter: https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/hyku-xr/02_goennert_et_al_xtremrisk_sturmflutkomponenten.pdf
- [18] I. Haigh, R. Nicholls, N. Wells. Rising sea levels in the English Channel 1900 to 2100. Proceedings of the ICE–Maritime Engineering, 164, (2), 81-92. 2011
- [19] K. J. Horsburgh, C. Wilson. Tide-surge interaction and its role in the distribution of surge residuals in the North Sea. *Journal of Geophysical Research*, 112 (C8). 2007
- [20] J. Hunter. Estimating sea-level extremes under conditions of uncertain sea-level rise. *Climatic Change*, 99:331-350. 2010
- [21] J. Jensen, C. Mudersbach, S. Dangendorf, Untersuchungen zum Einfluss eines veränderten Meeresspiegels auf die Extremwasserstände an der Deutschen Nordseeküste. 2. Sachstandsbericht im Rahmen des BMVBS-Ressortforschungsprogrammes KLIWAS. 2012
- [23] J. Jensen, C. Mudersbach, S. Dangendorf. Untersuchungen zum Einfluss der Astronomie und des lokalen Windes auf sich verändernde Extremwasserstände in der Deutschen Bucht. Zwischenbericht im Rahmen des BMVBS-Ressortforschungsprogrammes KLIWAS. 2013
- [24] P. Krause, D. Boyle, F. Bäse. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. In: Krause P. et al. (Hrsg.): Data, parameter and model uncertainty in large scale hydrological modeling. *Advances in Geosciences*. 2005
- [25] O. Krüger, H. von Storch. Evaluation of an Air-Pressure-Based Proxy for Storm Activity. *J. Climate*, 24, p. 2612-2619. 2011

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

- [26] O. Krüger, F. Schenk, F. Feser, R. Weisse, R. Inconsistencies between long-term trends in storminess derived from the 20CR reanalysis and observations. *J. Climate*, e-View. 2012
- [27] K. E. Leffler, D. A. Jay. Enhancing tidal harmonic analysis: Robust (hybrid L-1/L-2) solutions. *Continental Shelf Research*, v 29, p 78-88. 2009
- [28] J. Lindenberg, H. Mengelkamp, G. Rosenhagen. Representativity of near surface wind measurements from coastal stations at the German Bight. *Meteorologische Zeitschrift*, 21(1):99-106. 2012
- [29] M. Menéndez, P. L. Woodworth. Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge dataset. *J Geophys Res Oceans*, 115:C10011. 2010
- [30] P. L. Woodworth, M. Menéndez, W. R. Gehrels. Evidence for Century-Timescale Acceleration in Mean Sea Levels and for Recent Changes in Extreme Sea Levels. *Surv Geophys*, 32:603-618. 2011
- [31] A. McMillan, C. Batstone, D. Worth, J. Tawn, K. Horsburgh, M. Lawless. Coastal flood boundary conditions for UK mainland and islands. Technical Report, Project: SC060064/TR2. 2011 [accessed 30/08/2011]. Online verfügbar unter: <http://publications.environment-agency.gov.uk/PDF/SCHO0111BTKE-E-E.pdf>
- [32] M. Marcos, M. N. Tsimplis, A. G. P. Shaw. Sea level extremes in southern Europe. *Journal of Geophysical Research*, 114. 2009
- [33] C. Mudersbach. Untersuchungen zur Ermittlung von hydrologischen Bemessungsgrößen mit Verfahren der instationären Extremwertstatistik. Siegen: Ph.D. thesis, Dissertation, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen. Lehrgebiet Wasserbau und Hydromechanik. 2009
- [34] S. H. Müller-Navarra, H. Giese. Improvements of an empirical model to forecast wind surge in the German Bight. *Ocean Dynamics*, 51, 385-405. 1999
- [35] S. H. Müller-Navara, W. Lange, S. Dick, K. C. Soetje. Über die Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage. *Promet*, 29 (1-4), 117-124. 2003
- [36] R. Pawlowicz, B. Beardsley, S. Lentz. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28, 929-937. 2002
- [37] D. Pugh. *Changing Sea Levels: Effects of tide, weather and climate*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2004
- [38] H. Schmidt, H. von Storch. German Bight storms analyzed. *Nature*, 365, 791. 1993
- [39] B. Schulz. Die periodischen und unperiodischen Schwankungen des Mittelwasserstandes an der flandrischen Küste (Oktober 1915-September 1918). *Aerologische und Hydrographische Beobachtungen der Deutschen Marine-Stationen*

während der Kriegszeit 1914-1918 / 1,1-27. Hamburg: Deutsche Seewarte. 1920

[40] F. Siegismund, C. Schrum. Decadal changes in the wind forcing over the North Sea. *Journal of Climate Research*, Vol. 18: 39–45. 2001

[41] A. Sterl, H. van den Brink, H. de Vries, R. Haarsma, E. van Meijgaard. An ensemble study of extreme storm surge related water levels in the North Sea in a changing climate. *Ocean Sci.*, 5, 369–378. 2009

[42] I. Vilibic, J. Sepic, A. Gaxotte. Coherent patterns in long-term sea-level variability trends derived from long-term tide gauge measurements. *Int. J. Climatol.*, 33(3):577-584. 2013

[43] T. Wahl, J. Jensen, T. Frank, I. D. Haigh. Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years. *Ocean Dynamics*, 61-5, 701-715. 2011

[44] WASA GROUP. Changing waves and storms in the Northeast Atlantic? *Bull Am Meteorol Soc*, 79:741-760. 1998

[45] R. Weisse, A. Pluess. Storm-related sea level variations along the North Sea coast as simulated by a high-resolution model 1958-2002. *Ocean Dynamics.*, 56, 16–25. 2006

[46] Weisse, von Storch. *Marine Climate and Climate Change: Storms, Wind Waves, and Storm Surges*. Springer, Heidelberg, Deutschland. 2009

[47] R. Weisse, H. von Storch, H. D. Niemeyer, H. Knaak. Changing North Sea storm surge climate: An increasing hazard? *Ocean & Coastal Management*, 68:58-68. 2012

[48] C. J. WILLMOT. On the validation of models. *Phys. Geogr.*, 2, 184-194. 1981

[49] K. Zhang, B. C. Douglas, S. P. Leatherman. Twentieth-century storm activity along the US east coast. *Journal of Climate*, 13, 1748–1761. 2000

KLIWAS-
25/2013

Untersuchungen
zum Einfluss der
Astronomie und
des lokalen
Windes auf sich
verändernde
Extremwasser-
stände in der
Deutschen Bucht

7 Anhang

7.1 Projektablaufplanung

7.1.1 Phase 1: Berechnung der Zeitreihen der astronomischen Tide und des Windstaus für verschiedene Pegel (fwu, BSH)

P1.1: Berechnung von Stundenwerten mit dem Programm U-Tide. Astronomien auf Basis des BSH Verfahrens werden durch das BSH zur Verfügung gestellt (Auflösung noch offen).

P1.2: Vergleich und Plausibilisierung der astronomischen Zeitreihen, z.B. durch Vergleiche mit den gemessenen Wasserstandswerten zu Zeiten mit geringen Windgeschwindigkeiten.

P1.3: Berechnung der Zeitreihen des Windstaus als Differenz aus gemessenen Wasserständen abzüglich der astronomischen Tide.

7.1.2 Phase 2: Beziehung zwischen Wasserständen und Wind an einzelnen Pegeln (fwu, BSH und DWD)

P2.1: Analyse verschiedener Zeitreihen des 10 m Windes an der Deutschen Nordsee Küste: Untersuchungen zu Brüchen in den Zeitserien, Unterschiede zwischen Daten unterschiedlicher zeitlicher Auflösung und Mittelung, räumliche Korrelation zu Zeitreihen anderer Messorte. Die Windzeitreihen und Metadaten werden vom DWD (Seewetteramt) bereitgestellt.

P2.2: Korrelationsuntersuchungen zwischen Wind und Windstau – zunächst nur für einzelne Pegel.

P2.3: Abstimmung nach kurzem Zwischenbericht: Gegebenenfalls Ableitung von empirischen Beziehungen zwischen Wind und Windstau für einzelne Küstenpegel.



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Bundesanstalt für Wasserbau
(BAW)**

Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

www.baw.de
info@baw.de

**Bundesamt für Seeschifffahrt
und Hydrographie (BSH)**

Bernhard-Nocht-Straße 78
20359 Hamburg

www.bsh.de
posteingang@bsh.de



**BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE**



Deutscher Wetterdienst (DWD)

Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach/Main

www.dwd.de
info@dwd.de

**Bundesanstalt für
Gewässerkunde (BfG)**

Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz

www.bafg.de
posteingang@bafg.de



IMPRESSUM

Herausgeber:

Bundesanstalt für Gewässerkunde
KLIWAS Koordination
Am Mainzer Tor 1
Postfach 20 02 53
56002 Koblenz
Tel.: 0261 / 1306-0
Fax: 0261 / 1306-5302
E-Mail: kliwas@bafg.de
Internet: <http://www.kliwas.de>

Redaktion: KLIWAS-Koordination
Bundesanstalt für Gewässerkunde

Autoren: Jürgen Jensen
Christoph Mudersbach
Sönke Dangendorf
Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)
an der Universität Siegen

Layout: Christin Hantsche und Tobias Knapp,
Bundesamt für Seeschifffahrt
und Hydrographie - Rostock

DOI: 10.5675/Kliwas_25.2013_Extremwasserstände